

Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil

**Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de
tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro
sodo – cálcico na produção de concretos**

Aline Pignaton Antônio

Vitória
2012

ALINE PIGNATON ANTÔNIO

**POTENCIALIDADES DO APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES DO PROCESSO DE LAPIDAÇÃO DO VIDRO
SODO – CÁLCICO NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós - Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração Construção Civil.

Vitória
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

A635p Antônio, Aline Pignaton, 1983-
Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos / Aline Pignaton Antônio. – 2012.
162 f. : il.

Orientador: João Luiz Calmon Nogueira da Gama.
Coorientador: Fernando Avancini Tristão.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Cimento. 2. Resíduos industriais. 3. Concreto. 4. Resíduos de vidro - Reaproveitamento. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Tristão, Fernando Avancini. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

ALINE PIGNATON ANTÔNIO

**POTENCIALIDADES DO APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO DE EFLUENTES DO PROCESSO DE LAPIDAÇÃO DO VIDRO
SODO – CÁLCICO NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área de Concentração Construção Civil, aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Vitória, 30 de março de 2012

Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Orientador

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Co-orientador

Prof. Dr. Ing. Marcel Olivier Ferreira de Oliveira
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro da banca examinadora

Prof. Dra. Geilma Vieira Lima
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro da banca examinadora

Prof. Dra. Desilvia Louzada Machado
Instituto Federal do Espírito Santo
Membro externo da banca examinadora

Aos meus melhores amigos: Pai, Mãe e Irmão, que me apóiam irrefutavelmente, pacientemente, para seguir sempre em frente e sempre acreditaram que eu conseguiria chegar onde quer que eu almejasse. A vontade de caminhar e procurar, acima de tudo, ser todos os dias um ser humano melhor vem, indubitavelmente, do amor incondicional ofertado a mim por vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente aos meus orientadores, João Luiz Calmon Nogueira da Gama e Fernando Avancini Tristão, pela atenção e instrução, por me guiar e auxiliar neste estudo. Pela paciência e cuidado que tiveram comigo durante a jornada e por todo o precioso conhecimento e oportunidades que me proporcionaram.

Agradeço a todo o corpo administrativo e coordenador do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

Devo agradecer com especial carinho aos colaboradores do Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, Carlos Izoton, Márcio Loss, Loriato, Jorge, Denise, Zampiele, Xuxa e Sônia pela dedicação e boa vontade, sem os quais também seria impossível realizar tantas tarefas e tantos ensaios. Mesmo em vista das dificuldades encontraram meios de viabilizar e bom humor para prosseguir.

Ao Professor Ronaldo Feu Rosa e aos colaboradores do Laboratório de Concreto do Instituto Federal do Espírito Santo, que não apenas permitiram a utilização do equipamento, mas também, muito gentilmente, prestaram toda a assistência necessária durante todo o processo.

Ao Professor Evaristo Nunes e aos colaboradores do Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo, pela disponibilidade em ajudar, compartilhar conhecimento e realizar os ensaios que integram esta pesquisa.

Aos colaboradores do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo

À Professora Geilma, de jeito tão delicado de falar e lidar, pelas valiosas contribuições e aconselhamento.

Ao colega James, pela contribuição nas análises estatísticas, sem as quais seria impossível conferir credibilidade ao presente estudo.

À minha amiga Poline, a química mais engenheira que conheci até hoje, por toda a ajuda e companheirismo, não apenas nos momentos mais críticos, mas também nos momentos em que valia a pena apenas estar por perto. Melhor companheira de quarto em congressos.

Ao amigo Celso, que, além de nos divertir, me fez a sugestão do tema que eu finalmente assumiria, depois de tantos percalços em busca de uma pesquisa que me despertasse real interesse e comprometimento.

Ressalto meu agradecimento à Mizu e à Concretos Vitória (Concrevit) pelo fornecimento do material necessário ao procedimento experimental.

Agradecimentos sinceros também à Viminás, onde fui gentilmente recebida nas visitas que realizei para a coleta do resíduo estudado e para a obtenção de informações de suma importância para o bom desenvolvimento de meu trabalho. Agradeço especialmente a Luiz Cláudio (Juca) e a Ítalo Gomes, que, com grande paciência, tornaram agradáveis as muitas visitas à empresa e me concederam todo o apoio necessário sempre que solicitados.

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Espírito Santo – FAPES, pelo subsídio financeiro, para que eu pudesse me dedicar exclusivamente às pesquisas que culminaram neste trabalho.

À Universidade Federal do Espírito Santo, pela disponibilização da estrutura necessária à realização dos ensaios e por todo o subsídio oferecido para nosso crescimento acadêmico.

Ao amigo Fernando Boechat, que, mesmo não estando fisicamente presente, povoa nossos pensamentos com a inteligência, alegria e serenidade que a ele eram tão peculiares. Pelas conversas bem humoradas, franqueza e todas as dicas e conselhos geniais sobre as coisas ao redor das quais a vida deve girar e sobre o que é realmente importante.

Agradeço ainda aos meus colegas mestrandos, que me ajudaram neste trabalho e foram bons companheiros durante esta jornada. A eles devo bons momentos, boas lembranças, partilha de conhecimentos e experiências.

A todos que de alguma forma fizeram parte e contribuíram à sua maneira ao longo desta caminhada.

***“Se, a princípio, a idéia não é absurda,
então não há esperança para ela”***

Albert Einstein

RESUMO

A busca pela reutilização dos resíduos gerados nos centros urbanos em franco crescimento, no intuito de poupar os recursos naturais, tem se mostrado constante, tanto no âmbito de evitar a exploração dos recursos como a deposição dos resíduos no meio ambiente. O objetivo principal deste estudo é utilizar o resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação de vidros sodo - cálcicos como substituto parcial do cimento na produção de concretos. As substituições em massa do cimento pelo resíduo empregado na forma de pó, com granulometria aproximada de 38 μm , seguiram as proporções de 0, 5, 10, 15 e 20%, para todos os ensaios compreendidos neste estudo. Primeiramente, foram estudadas pastas cimentícias, para determinação da expansibilidade. Os concretos produzidos foram submetidos a ensaios no estado fresco para determinação da consistência, teor de ar incorporado, massa específica e exsudação de água, conforme a normatização brasileira. Para determinação das propriedades mecânicas dos concretos em estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos de diâmetro de 10 cm e 20 cm de altura, submetidos a ensaios de resistência a compressão axial e resistência a tração por compressão diametral nas idades de 3, 7 e 28 dias e de módulo de elasticidade em idade superior a 28 dias. A análise estatística dos dados obtidos permitiu constatar que os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral apresentaram variação significativa e subdividiram-se em três grupos heterogêneos e distintos, enquanto os resultados dos outros ensaios apresentaram variação não significativa e homogeneidade entre os grupos. As misturas com maior quantidade de resíduos apresentaram redução da resistência mecânica, exceto pelo módulo de elasticidade, que apresentou sensível tendência de aumento com os maiores teores de substituição. Ainda assim, as resistências obtidas atendem à normatização brasileira vigente para concretos de finalidade estrutural. Amostras das pastas cimentícias e dos concretos endurecidos foram submetidas a análises por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria por energia dispersiva (EDS). Formações cristalinas de hidróxido de cálcio puderam ser percebidas em diferentes níveis para cada amostra.

Palavras-chave: substituição, cimento, resíduo, pó de vidro, efluentes, concreto.

ABSTRACT

The search for the reuse of waste generated in the rapidly growing urban centers in order to save natural resources, has remained fairly constant, both in the context of preventing the exploitation of resources and waste disposal on the environment. The main objective of this study is to use the waste from the treatment plant effluent in the process of cutting glass soda - calcium as a partial substitute for cement in concrete production. The substitutions on the weight of cement by the residue used in powder form with a particle size of about 38 μm , followed proportions of 0, 5, 10, 15 and 20% for all tests included in this study. First, cement pastes were studied for determining the expansion. The fresh concretes were subjected to slump tests and tests for determination of incorporated air content, density and water exudation, according to the Brazilian Standards. To determine the mechanical properties of the hardened concrete steel-molded cylindrical specimens were produced, with diameter of 10 cm and 20 cm height, tested for compressive strength and tensile strength at ages 3, 7 and 28 days and modulus of elasticity at the age of 28 days. Statistical analysis of data obtained allowed establishing that the test results of compressive strength showed significant variation and were subdivided into three heterogeneous and distinct groups, while the results of other tests showed no significant variation and homogeneity between the groups. Mixtures with more waste had mechanical strength reduced, except for the modulus of elasticity, which showed appreciable upward trend with the highest levels of replacement. Still, the strength results obtained meet the current Brazilian Standards for structural concrete. Samples of cement pastes and hardened concrete were examined by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometry (EDS). Crystalline inclusions of calcium hydroxide could be noticed at different levels for each sample.

Keywords: replacement, cement, waste, glass powder waste, concrete.

SUMÁRIO

Capítulo 1	19
<i>Introdução</i>	19
1. Introdução.....	20
1.1 Justificativa e importância do tema	22
1.2 Objetivo	26
1.2.1 Objetivo geral	26
1.2.2 Objetivos específicos.....	27
1.3 Estrutura do trabalho	27
Capítulo 2	30
<i>Revisão Bibliográfica</i>	19
2. Revisão Bibliográfica	31
2.1 Vidro	32
2.2 Processo de lapidação das chapas de vidro sodo - cálcico.....	33
2.3 Processo de obtenção do resíduo de ETE aplicado neste estudo.....	35
2.4 Aplicação do resíduo de vidro na construção civil.....	39
2.4.1 Aplicação do resíduo de vidro em concretos	40
Capítulo 3	54
<i>Programa Experimental</i>	54
3. Programa Experimental	55
3.1 Planejamento do programa experimental.....	56
3.1.1 Variáveis do programa experimental	57
3.2 Apresentação geral do experimento	58
3.3 Materiais e métodos.....	63
3.3.1 Materiais.....	63
3.3.2 Métodos.....	71
3.3.3 Métodos estatísticos utilizados	84
Capítulo 4	89
<i>Resultados e Discussões</i>	89
4. Resultados e Discussões.....	90
4.1 Ensaio realizados nas pastas cimentícias	91
4.1.1 Determinação de expansibilidade pelo método de Le Chatelier.....	91

4.2	Ensaio realizado nos concretos em estado fresco	92
4.2.1	Determinação de consistência pelo abatimento de tronco de cone.....	92
4.2.2	Determinação de massa específica pelo método pressométrico	93
4.2.3	Determinação da exsudação de água	93
4.2.4	Determinação do teor de ar incorporado.....	94
4.3	Ensaio realizado nos concreto em estado endurecido	95
4.3.1	Resistência à compressão axial	95
4.3.2	Resistência à tração por compressão diametral	99
4.3.3	Determinação do módulo estático de elasticidade	104
4.4	Resultados de caracterização da microestrutura	106
4.4.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	107
	Capítulo 5	131
	<i>Conclusões e Considerações Finais</i>	131
5.	Conclusões e Considerações Finais	132
5.1	Conclusão geral	133
5.2	Conclusões específicas	133
5.2.1	Conclusões relativas às pastas cimentícias	133
5.2.2	Conclusões relativas aos concretos em estado fresco.....	134
5.2.3	Conclusões relativas aos concretos em estado endurecido.....	136
5.3	Sugestões para futuros estudos	138
	Referências	140
	<i>Referências Normativas e Bibliográficas</i>	140
	<i>Referências Normativas</i>	140
	<i>Referências Bibliográficas</i>	140
	Apêndices	149
	<i>Resultados Individuais dos Ensaio em Pastas Cimentícias e em Concretos</i> <i>Endurecidos</i>	149
	APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios realizados com as pastas cimentícias.....	150
	APÊNDICE B – Resultados individuais dos ensaios realizados com os concretos endurecidos	154

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Rebolo adiamantado já desgastado pelo uso.....	34
Figura 2.2 - Maquinário para lapidação de chapas de vidro	34
Figura 2.3 - Maquinário para diferentes tipos de lapidação de chapas de vidro	35
Figura 2.4 - Reservatório da água proveniente do processo de lapidação	37
Figura 2.5 - Filtro de decantação de resíduos e o transbordo da água limpa	38
Figura 2.6 - Resíduo epositado no tanque agitador.....	39
Figura 2.7 - Aspecto do resíduo após a passagem pelo filtro prensa	39
Figura 2.8 - Fluxograma do processo completo de obtenção do resíduo de ETE.....	40
Figura 3.1 - Organograma do programa experimental.....	63
Figura 3.2 - Aparência do resíduo aplicado às misturas de concreto	69
Figura 3.3 - Curva granulométrica da primeira amostra submetida ao ensaio	70
Figura 3.4 - Curva granulométrica da segunda amostra.....	70
Figura 3.5 - Curvas granulométricas resultantes dos três ensaios	70
Figura 3.6 - Difratoograma de raios X do resíduo estudado	72
Figura 3.7 - Betoneira de eixo inclinado com capacidade de 350 litros	75
Figura 3.8 - Aspecto da massa de concreto de traço referência.....	76
Figura 3.9 - Início da preparação dos corpos de prova	78
Figura 3.10 - Corpos de prova finalizados.....	78
Figura 3.11 - Corpos de prova em câmara úmida para processo de cura	79
Figura 3.12 - Retirada do tronco de cone para ensaio de consistência	79
Figura 3.13 - Concreto referência no momento da aferição da consistência	80
Figura 3.14 - Recipiente utilizado para o ensaio de massa específica	80
Figura 3.15 - Equipamento para realizar o ensaio de teor de ar incorporado	81
Figura 3.16 - MEV equipado com EDS para análise microestrutural das amostras..	83
Figura 3.17 - Metalizador de amostras	85
Figura 3.18 - Amostras metalizadas com platina para inserção no MEV.....	86
Figura 4.1 - Valores médios globais de resistência à compressão axial dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias em função do percentual de substituição.....	99
Figura 4.2 - Gráfico representativo de interação dos fatores controláveis e dos dados de resistência à compressão axial considerados no modelo estatístico.....	100

Figura 4.3 - Gráfico representativo dos valores médios globais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos na idades de 3, 7 e 28 dias em função do percentual de substituição.....	103
Figura 4.4 - Gráfico demonstrativo do aumento da resistência à tração por compressão diametral em função da idade dos concretos.....	104
Figura 4.5 - Gráfico demonstrativo do aumento do módulo de elasticidade em função do teor de substituição.....	107
Figura 4.6 - Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço referência, com ampliações de 300 vezes (a) e de 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS.	110
Figura 4.7 - EDS do ponto 1, marcado na pasta cimentícia de traço referência na figura 4.10 (b).....	111
Figura 4.8 - Imagens obtidas por MEV das pastas cimentícias de traço S5, com ampliações de 2000 vezes (a) e 5000 vezes (b), onde o ponto 1 foi marcado para análise de EDS.	112
Figura 4.9 - EDS do ponto 1, marcado na pasta cimentícia de traço S5 4.12 (b) ...	113
Figura 4.10 - Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço S10, com ampliações de 300 vezes (a) e de 2000 vezes (b)	115
Figura 4.11 - Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço S15, com ampliações de 300 vezes (a) e em 5000 vezes (b)	115
Figura 4.12 - Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço S20, com ampliações de 300 vezes (a) e de 2000 vezes (b).	117
Figura 4.13 - Imagens obtidas por MEV do concreto referência ampliadas em 300 (a) e em 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS	118
Figura 4.14 - EDS do ponto 1 marcado na figura 4.13 (b), relativa à amostra do concreto referência	119
Figura 4.15 - Imagens obtidas por MEV do concreto de traço S5, ampliadas em 2000 (a) e em 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS.....	120
Figura 4.16 - EDS do ponto 1, marcado na figura 4.15 (b), relativa à amostra do concreto de traço S5.....	121
Figura 4.17 - Imagens obtidas por MEV da amostra de concreto de traço S10, ampliadas em 2000 (a) e em 10000 vezes (b), onde estão marcados os pontos 1 e 2, para análise de EDS.	122

Figura 4.18 - EDS do ponto 1, marcado na figura 4.17 (b), relativa à amostra do concreto de traço S10	123
Figura 4.19 - EDS do ponto 2, marcado na figura 4.17 (b), relativa à amostra do concreto de traço S10	124
Figura 4.20 - Imagens obtidas por MEV da amostra de concreto de traço S15, ampliadas em 306 (a) e em 5000 vezes (b). Pontos 1 e 2 marcados para análise de EDS na figura 4.21 (b).	125
Figura 4.21 - EDS do ponto 1, marcado em 4.20 (b), relativa à amostra de concreto de traço S15.....	126
Figura 4.22 - EDS do ponto 2, marcado em 4.21 (b), relativa à amostra de concreto de traço S15.....	127
Figura 4.23 - Imagens obtidas por MEV do concreto de traço S20, ampliadas em 300 (a) e em 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS.....	128
Figura 4.24 - EDS do ponto 1, marcado em 4.23 (b), relativa à amostra de concreto de traço S20.....	129
Figura 4.25 - Imagens obtidas por MEV dos concretos de traço REF e S20, ampliadas em 300 vezes (a) e (c) e em 5000 vezes (b) e (d), enfatizando efeito da incorporação do resíduo nas zonas de transição dos concretos.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Caracterização química do vidro	33
Tabela 3.1 - Representação do projeto fatorial para os ensaios com os concretos em estado fresco	60
Tabela 3.2 - Representação do projeto fatorial cruzado completo dos ensaios com os concretos em estado endurecido	62
Tabela 3.3 - Distribuição granulométrica da areia	66
Tabela 3.4 - Caracterização da areia	66
Tabela 3.5 - Distribuição granulométrica da brita	67
Tabela 3.6 - Caracterização da brita	67
Tabela 3.7 - Caracterização do cimento Portland CPV ARI RS.....	68
Tabela 3.8 - Distribuição granulométrica do resíduo.	70
Tabela 3.9 - Caracterização do resíduo de ETE estudado.	72
Tabela 3.10 - Nomenclatura dos traços conforme teor de substituição	74
Tabela 3.11 - Traços empregados para as pastas cimentícias.....	75
Tabela 3.12 - Relação dos traços adotados e da composição em massa das misturas de concreto.....	76
Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de expansibilidade a quente.	93
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios para determinação das consistências.....	94
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de massa específica (método pressométrico)	95
Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de exsudação de água.....	95
Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios para determinação do teor de ar incorporado nos traços de concreto (método pressométrico).....	96
Tabela 4.6 - Resultados dos valores médios de resistência a compressão axial.....	97
Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados dos ensaios de resistência à compressão axial para os fatores controláveis considerados no modelo estatístico.....	98
Tabela 4.8 - Grupos heterogêneos determinados pelo teste de Tukey, se avaliados os traços entre si quanto à resistência à compressão axial aos 28 dias de idade. ...	99
Tabela 4.9 - Resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral para os traços de concreto endurecido.....	102

Tabela 4.10 - Resultado da análise de variância (ANOVA) dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, para os fatores controláveis considerados no modelo estatístico	103
Tabela 4.11 - Grupo homogêneo determinado pelo teste de Tukey, se avaliados os traços entre si quanto à resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.	105
Tabela 4.12 - Resultados dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão para cada traço do concreto endurecido	106
Tabela 4.13 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados dos ensaios de módulo estático de elasticidade à compressão para os fatores controláveis considerados no modelo estatístico.	107
Tabela A.1.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da expansibilidade Le Chatelier das pastas cimentícias de traço referência	152
Tabela A.1.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da expansibilidade Le Chatelier das pastas cimentícias de traço S5	153
Tabela A.1.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da expansibilidade Le Chatelier das pastas cimentícias de traço S10.....	153
Tabela A.1.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da expansibilidade Le Chatelier das pastas cimentícias de traço S15.....	154
Tabela A.1.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da expansibilidade Le Chatelier, das pastas cimentícias de traço S20.....	154
Tabela B.1.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à compressão axial em concretos de traço referência.....	156
Tabela B.1.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à compressão axial em concretos de traço S5.....	157
Tabela B.1.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à compressão axial em concretos de traço S10	157
Tabela B.1.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à compressão axial em concretos de traço S15	158
Tabela B.1.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à compressão axial em concretos de traço S20	158
Tabela B.2.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em concretos de traço referência	159

Tabela B.2.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em concretos de traço S5.....	160
Tabela B.2.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em concretos de traço S10.....	160
Tabela B.2.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em concretos de traço S15.....	161
Tabela B.2.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em concretos de traço S20.....	161
Tabela B.3.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em concretos de traço referência	162
Tabela B.3.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em concretos de traço s5	162
Tabela B.3.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em concretos de traço S10.....	162
Tabela B.3.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em concretos de traço S15.....	163
Tabela B.3.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em concretos de traço S20.....	163

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

Esta pesquisa teve origem a partir de uma visita a uma indústria beneficiadora de vidros sodo-cálcicos (ou vidros planos), comumente utilizados na construção civil. O processo gerador do resíduo estudado inicia-se com a lapidação das chapas de vidro sodo-cálcico, mecanismo que apara as extremidades, evitando o acabamento cortante das chapas. Sendo a água indispensável no processo de lapidação do vidro, sua reutilização torna-se importante para a indústria, tanto financeiramente como ecologicamente. O reaproveitamento máximo da água pôde ser feito através da instalação de uma estação vertical de tratamento de efluentes, dotada de um filtro prensa em seu processo final de decantação e clarificação da água. Ao final da prensagem, são obtidas as tortas utilizadas neste estudo, onde se pode destacar a presença de grande quantidade de dióxido de silício (SiO_2), além do óxido de alumínio (Al_2O_3), resultante da utilização de floculantes e clarificantes para o

tratamento dos efluentes provenientes dos galpões onde ocorre a lapidação das chapas de vidro.

Este estudo segue a Linha de Pesquisa de Resíduos e Subprodutos Industriais – Reciclagem e uso como materiais de construção e aborda a aplicação do resíduo proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) instalada na Viminhas, situada na Serra, estado do Espírito Santo, Brasil, como substituto do cimento em concretos. Os estudos aqui apresentados iniciaram-se com uma revisão bibliográfica a respeito da substituição de cimentos Portland de tipos variados por material semelhante ao coletado para a aplicação nesta pesquisa. As dosagens e as substituições também foram determinadas com base em estudos realizados anteriormente, por outros autores, nesta mesma linha de pesquisa. Foram adotados os teores de 0, 5, 10, 15 e 20% de substituição do cimento Portland de alta resistência inicial e resistente a sulfatos (CPV ARI RS) pelo resíduo de ETE coletado.

Em um primeiro momento, foram realizados ensaios de expansibilidade pelo método de Le Chatelier com pastas cimentícias com os teores de substituição propostos, apenas no intuito de identificar as propriedades do material estudado e sua interação com o cimento utilizado, visto que o foco deste trabalho é a utilização do resíduo de ETE na produção de concretos

Em seguida, os concretos com as substituições citadas foram produzidos e foram verificadas suas propriedades em estado fresco pelos ensaios de determinação de consistência por abatimento de tronco de cone, determinação de massa específica pelo método pressométrico, determinação de quantidade de água exsudada e do teor de ar incorporado.

A próxima etapa consistiu na moldagem corpos de prova de concreto de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Os concretos endurecidos foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral nas idades de 3, 7 e 28 dias. Os ensaios de módulo estático de elasticidade foram realizados após a idade de 28 dias. Os resultados obtidos foram submetidos a testes estatísticos de análise de variância (ANOVA) e de comparação múltipla entre as médias, pelo método de Tukey.

Tanto as pastas cimentícias como os concretos utilizados nos ensaios foram submetidos à análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV), e espectrometria de energia dispersiva, também após a idade de 28 dias.

Realizados todos os ensaios, os resultados foram analisados e discutidos, para que se chegasse a uma conclusão em torno da viabilidade de utilização do resíduo de ETE como substituto parcial do cimento Portland CPV ARI RS em concretos com fins estruturais, tendo sido fixado o valor de 35 MPa como referência para a comparação dos resultados de resistência à compressão axial.

1.1 Justificativa e importância do tema

O crescimento populacional e, conseqüentemente, de uma sociedade de consumo ao longo dos séculos e a necessidade do avanço tecnológico da ciência e das indústrias no intuito de suprir esta população, promoveram o desenvolvimento de novas técnicas de produção. Determinou-se uma operação onde a produção do bem de consumo passou a iniciar-se nas fábricas, com o processamento das matérias primas retiradas diretamente do meio ambiente. Seguidamente, a chegada deste bem ao consumidor e sua utilização até o fim de sua vida útil, quando seria descartado no mesmo ambiente do qual sua matéria prima foi retirada. Este modelo, no entanto, apresenta-se insustentável na medida em que os recursos, explorados indiscriminadamente, são ainda desperdiçados no momento da deposição dos resíduos gerados pela sociedade.

Atualmente, busca-se um modelo onde um ciclo fechado ocorra, ou seja: a matéria utilizada para a produção dos bens de consumo é reciclada, reutilizada, reaproveitada no mesmo processo produtivo ou de outros bens de consumo.

A estratégia ideal para a gestão de resíduos é a prevenção da geração dos mesmos. Segundo Calmon (2007), deve-se reduzir a quantidade de resíduos gerada e minorar a presença de substâncias perigosas nos produtos, no intuito de diminuir riscos e simplificar sua disposição. Acrescenta ainda que a prevenção dos resíduos esteja intimamente ligada à melhoria dos processos de fabricação e à influencia

deste pensamento nos consumidores, que devem ser incentivados a demandarem produtos ecologicamente adequados e menos embalados.

No entanto, a prevenção nem sempre é possível. Neste caso, a solução ideal seria o reuso ou a reciclagem destes resíduos.

Nos casos mais complicados, como no caso de resíduos tóxicos, de alto poder de contaminação, onde a reciclagem não é possível, as soluções são a incineração ou a deposição destes resíduos em aterros sanitários, devendo esta última ser evitada.

Neste trabalho, trata-se do resíduo de vidro gerado principalmente nos centros urbanos. De acordo com a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2002) e com a NBR 10004 (ABNT, 2004), o vidro é um resíduo não inerte (classe II B), reciclável para outras destinações. Deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário sendo dispostos de modo a sua utilização ou reciclagem futura. Trata-se de um material 100% reciclável, salvo casos em que há contaminações que inviabilizem o processo. Além das impurezas, há também outros fatores limitantes, como o custo do transporte proibitivo e a mistura de sucatas de cores diferentes, o que dificulta a separação do resíduo.

O vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea, obtida a partir do resfriamento de uma massa em fusão de óxidos ou de seus derivados e misturas, sendo a sílica ou o óxido de silício seu principal constituinte. Tais substâncias endurecem pelo aumento contínuo de viscosidade atingindo a condição de rigidez, mas não a cristalização (SANTOS, 2009).

São fabricados no Brasil, aproximadamente, 800.000 toneladas de vidro por ano. Mas os programas de incentivo à reciclagem e principalmente o preço reduzido para a produção de embalagens produzidas com o refugo de vidro têm dado resultado: atualmente, 47% das embalagens de vidro são recicladas no Brasil, o que equivale a 470 mil ton/ano de vidro reciclado e transformado novamente em embalagens. Desse total, 40% são oriundos da indústria de envase, 40% do mercado difuso, 10% do chamado "canal frio" (bares, restaurantes, hotéis etc) e 10% do refugo da indústria (CEMPRE, 2010).

As indústrias beneficiadoras de chapas de vidro também cumprem um papel importante na reciclagem dos resíduos. A empresa beneficiadora visitada e colaboradora neste trabalho, a Viminis – ES, por exemplo, encaminha todos os estilhaços e chapas danificadas para a indústria de origem, onde esse resíduo será 100% reaproveitado e transformado em novas chapas de vidro ou mesmo em vidros decorativos, nos casos em que for impossível a recuperação.

No entanto, o processo de beneficiamento das chapas de vidro gera, por si só, um resíduo de aproveitamento inviável para a indústria vidreira. É o resíduo proveniente da lapidação dos vidros beneficiados. O resíduo é levado juntamente com grande quantidade de água até uma estação de tratamento de efluentes, onde esta água será tratada e reutilizada no processo de lapidação dos vidros planos. Ao final de todo o processo de tratamento dos efluentes, é obtida uma quantidade significativa de resíduos que deverá ser, em grande parte, encaminhado para aterros sanitários. Apenas uma pequena parte é utilizada na confecção de tijolos, em uma pequena fábrica local. O processo completo será explanado e ilustrado mais à frente.

Muitos estudos foram desenvolvidos, desde 1960, no intuito de reutilizar o vidro na produção de materiais de construção. Calmon (2007) enumera como possíveis reutilizações aos resíduos municipais de vidro na construção civil como pozolanas, em sistemas de drenagem, agregados, fibra de vidro, bases e sub-bases de rodovias e ferrovias.

A busca pela reutilização dos resíduos gerados nos centros urbanos no intuito de poupar os recursos naturais tem se mostrado constante. Especificamente no caso de resíduos industriais, os órgãos ambientais responsáveis têm fiscalizado a geração de resíduos e criado uma legislação rigorosa em relação ao descarte dos mesmos. Afinal, é do setor industrial que provêm os resíduos de maior toxicidade e periculosidade. Estes resíduos, quando não absorvidos pela indústria da reciclagem são geralmente direcionados a aterros sanitários, nos quais são depositados e ali permanecem por muitos anos, inutilizando o solo a eles destinado e promovendo a desertificação de milhares de metros quadrados todos os anos.

A resistência do vidro ao processo de decomposição o classifica como um produto praticamente indestrutível quando submetido às condições naturais de deterioração.

Paiva *et al.* (2010) afirma que a maioria dos estudos recomenda a utilização do pó de vidro para sua aplicação em concretos, como substituto total ou parcial de agregados miúdos. No entanto, há estudos sendo desenvolvidos para a utilização do vidro como *filler* e/ou como substituto parcial de cimento Portland em produtos cimentícios. Dentre estes, Meyer e Xi (1999) aplicaram resíduos de vidro como agregado em concreto e não observaram expansões significativas quando utilizaram vidro moído em tamanhos menores que 0,30 mm. Outros estudos sobre o emprego do resíduo de vidro como agregados foram conduzidos por Corinaldesi *et al.* (2005), Topçu e Canbaz (2004), López *et al.* (2005) e Shi e Zheng (2007) evidenciaram a necessidade de moagem do resíduo para a homogeneização da granulometria. Shao *et al.* (2000) utilizaram vidros moídos do tipo sodo-cálcicos em argamassas. Os resultados mostraram aumento de resistência à compressão e redução das expansões em ensaios de reatividade álcali-sílica em função da incorporação do resíduo de vidro, principalmente com tamanho de partícula menor que 75 μm . Alguns destes estudos serão comentados posteriormente neste trabalho.

Porém, Idir *et al.* (2010) reportam em seu estudo as desvantagens da utilização de grandes quantidades de pó de vidro devido ao custo do processo de moagem e demonstram ainda a eficácia da mistura de partículas maiores, utilizadas como agregados graúdos à partículas finas, que cumpririam a função de agregados miúdos.

No entanto, como o resíduo a ser utilizado nesta pesquisa não necessita de moagem, por já ser resultante de um processo de polimento que é uma etapa inerente ao beneficiamento das chapas de vidro, excluindo, portanto, a desvantagem reportada pelos autores Idir *et al.* (2010).

Shi e Zeng (2007) enumeram alguns dos benefícios da utilização de resíduos de vidro em cimentos e concretos:

- Elimina custos de depósito dos resíduos em aterros sanitários, que tendem a aumentar;
- Preservação do meio ambiente por evitar a extração de grandes quantidades de matéria prima todos os anos;

- Aumento da vida útil dos aterros sanitários, contribuindo com a preservação das áreas livres;
- Economia de quantidade significativa de energia e redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), além de outros poluentes emitidos a partir da produção do clínquer;
- Aumento da conscientização pública da problemática e dos benefícios da reciclagem de resíduos;
- Disponibilidade de muitos usos para produtos à base de vidro reciclado, sem comprometimento do uso ou qualidade.

Em vista dos benefícios enumerados, o desenvolvimento de estudos onde o resíduo de vidro possa ser aplicado de modo a não comprometer as propriedades dos concretos, apresenta-se não apenas bastante benéfico, mas também necessário em vista das possibilidades de escasseamento de matéria prima.

A revisão bibliográfica realizada, salvo melhor juízo, revelou que não há muitas pesquisas relativas à utilização de resíduos semelhantes ao utilizado neste estudo, no que diz respeito à sua origem.

Recentemente, estudos utilizando o resíduo também proveniente da estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação de vidros planos coletado em uma indústria beneficiadora de vidros iniciaram-se na Universidade Federal de Uberlândia, no estado de Minas Gerais (Brasil). Os resultados publicados por Salomão *et al.* (2010) e Araújo *et al.* (2011) serão comentados no capítulo 2 desta dissertação.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa consiste na aplicação do resíduo proveniente da ETE de uma indústria beneficiadora de vidros planos à construção civil, como

componente substitutivo da massa de cimento em concretos para fins estruturais, fixando-se como referência a resistência de 35 MPa.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, podem ser relacionados:

- Avaliar e discutir os resultados no intuito de concluir a respeito da viabilidade de aplicação do resíduo utilizado como substituto parcial do cimento Portland CPV ARI RS em concretos com fins estruturais
- Analisar a expansibilidade das pastas cimentícias contendo os teores de substituição propostos;
- Avaliar a trabalhabilidade de cada um dos traços de concreto em estado fresco;
- Relacionar, do concreto em estado endurecido, os valores e as variações de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral nas idades de 3, 7 e 28 dias e do módulo estático de elasticidade à compressão após a idade de 28 dias nos corpos de prova ensaiados em função da variação dos teores de substituição adotados;
- Analisar estatisticamente a variância dos resultados pelo método ANOVA e a comparação múltipla das médias pelo método de Tukey;
- Analisar a microestrutura dos concretos estudados.

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação de mestrado encontra-se estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices. A seguir é apresentada uma sucinta descrição a respeito do conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 1 é introdutório e justifica o tema abordado e sua importância, apresentando também os objetivos geral e específicos da pesquisa e a estrutura do trabalho produzido através desta.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica apresenta a origem e os processos de obtenção do resíduo utilizado neste estudo e suas características, comparando-as com as do vidro em estado puro.

O capítulo seguinte trata da metodologia do programa experimental, na qual estão descritas as variáveis envolvidas na pesquisa, os materiais empregados e sua caracterização, incluindo o método de preparo do resíduo para torná-lo apto à aplicação neste estudo. Os organogramas relativos à caracterização dos materiais e ao programa experimental apresentados permitem visualização completa de todo o experimento. Também constam do capítulo 3 as dosagens e os teores de substituição adotados para as pastas cimentícias e para os concretos estudados em estado fresco e endurecido e o preparo dos ensaios e moldagem dos corpos de prova utilizados para a obtenção dos resultados, submetidos posteriormente a uma análise estatística e microestrutural, visando avaliar se os objetivos propostos foram alcançados.

No capítulo 4, estão os resultados obtidos no programa experimental, bem como algumas observações feitas durante a realização dos ensaios. Inicialmente, são relatados os resultados relativos às pastas cimentícias, no que tange à expansibilidade. Em seguida, é apresentada a avaliação de propriedades relacionadas à determinação de características físicas e mecânicas dos concretos em estado fresco e endurecido. Ao final de cada uma destas etapas, são discutidas as observações feitas durante a realização dos ensaios e os resultados obtidos e submetidos a testes estatísticos, além das análises microestruturais das pastas cimentícias e dos concretos utilizados nos ensaios.

No quinto capítulo, são apresentadas as conclusões específicas obtidas através das observações, resultados e análises relativas às pastas cimentícias com diferentes teores de substituição e aos diferentes traços de concreto em estado fresco e endurecido. São inseridos comentários em torno da análise estatística dos resultados obtidos na avaliação das propriedades mecânicas dos concretos endurecidos, no intuito de reforçar as conclusões específicas atreladas aos corpos de prova ensaiados. A análise microestrutural das pastas cimentícias e dos concretos endurecidos após a idade de 28 dias realizada no capítulo anterior

corroboram com algumas das conclusões específicas expostas neste capítulo. São apresentadas considerações a respeito deste estudo e sugestões para estudos futuros, que venham e contribuir e ampliar o conhecimento sobre a utilização de resíduo de ETE em concretos, no intuito de viabilizar em larga escala a utilização do pó de vidro em substituição ao cimento Portland CPV ARI RS em concretos de alta resistência inicial.

Em seguida, estão contidas as referências normativas e bibliográficas utilizadas para a produção deste trabalho e, ao final do volume, estão os apêndices, onde tabelas mais completas e com maiores detalhes, elaboradas a partir dos resultados individuais obtidos nos ensaios de cada pasta cimentícia ou corpo de prova testado podem ser analisadas.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2. Revisão Bibliográfica

No capítulo anterior, em que a abordagem do tema desta pesquisa é justificada e sua importância é destacada, são apresentados também o objetivo geral e os objetivos específicos traçados para o estudo realizado. A estrutura do trabalho e o conteúdo de cada capítulo foram sucintamente descritos, objetivando demonstrar a organização sequencial das etapas pertinentes ao programa experimental, visando a rápida compreensão global do procedimento.

Neste capítulo, é fornecido inicialmente um embasamento teórico realizado por meio de revisão bibliográfica e análise de estudos realizados anteriormente que estejam relacionados ao assunto tratado nesta dissertação, enfatizando, no entanto, a utilização do resíduo de vidro finamente moído em concretos, visto que poucos estudos foram recentemente realizados com o aproveitamento do resíduo de ETE do processo de lapidação de vidros sodo-cálcicos.

2.1 Vidro

O vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea, obtida a partir do aquecimento de óxidos e derivados, até uma temperatura entre 1600 e 1800° C, quando os constituintes adquirem fluidez suficiente para serem moldados e posteriormente resfriados. Como pode ser observado na tabela 2.1, os vidros possuem como constituinte principal a sílica ou o dióxido de silício (SiO₂).

Tabela 2.1 - Caracterização química do vidro

Óxidos	%
SiO ₂	72,40
CaO	8,60
Na ₂ O	13,60
Al ₂ O ₃	0,70
MgO	4,00
K ₂ O	0,30
Fe ₂ O ₃	0,11
TiO ₂	0,02
SO ₂	0,20

Nota: Dados cedidos pela Viminis S/A

Fonte: Acervo Pessoal

Segundo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro, a ABIVIDRO (2010), o vidro pode ser classificado em três tipos, de acordo com a composição química que apresentam:

- Vidro sodo-cálcico: utilizado em embalagens, de forma geral (garrafas, potes, etc.) e como o chamado vidro plano, aplicado na indústria automobilística, construção civil e em eletrodomésticos;
- Vidro boro-silicato: utilizados em utensílios domésticos resistentes a choques térmicos;
- Vidro ao chumbo: utilizado em peças que requerem mais brilho, função atribuída à adição de chumbo, como copos, taças, cálices, ornamentos, etc.

Neste estudo, utilizar-se-à um resíduo com grandes teores de vidro sodo-cálcico, já que provém da indústria beneficiadora de vidros planos, utilizados predominantemente na construção civil. O resíduo utilizado para esta pesquisa origina-se do processo de lapidação de chapas de vidro na Viminias, indústria beneficiadora.

2.2 Processo de lapidação das chapas de vidro sodo - cálcico

O resíduo utilizado neste estudo resulta do tratamento da água necessária ao processo de lapidação do vidro sodo-cálcico ou o chamado vidro plano, utilizado em grande escala na construção civil.

O processo de lapidação é realizado antes do processo de têmpera das chapas de vidro e ocorre de maneira simples. O vidro já cortado no tamanho previamente idealizado para utilização passa por rebolos adiamantados (figura 2.1), primeiramente por um mais grosso e depois por um rebole mais fino (figura 2.2).

Finalizado o processo de lapidação, onde são aparadas as imperfeições geradas pelo corte das chapas, estas passam pelo processo de polimento, responsável pelo arredondamento das laterais já lapidadas.

Figura 2.1 - Rebole adiamantado já desgastado pelo uso



O rebole adiamantado já desgastado é remanufaturado e reutilizado nas máquinas de lapidação de chapas de vidro, evitando maior geração de resíduos.

Fonte: Cortesia de Viminias, 2011.

Figura 2.2 – Maquinário para lapidação de chapas de vidro



Rebolas de diferentes tamanhos e funções. Acima de cada rebole há um pequeno esguicho de água, para amenizar a temperatura e o impacto gerado pelo atrito na chapa de vidro.

Fonte: Cortesia de Viminias, 2011.

Há maquinários para diferentes tipos de lapidação, inclusive para fazer o chamado bisote, ou para lapidar simultaneamente mais de um lado da chapa (figura 2.3).

Figura 2.3 – Maquinário para diferentes tipos de lapidação de chapas de vidro



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

(a) maquinário para lapidação de um lado por vez para chapas de 6mm e (b) para chapas de 8mm; (c) maquinário que lapida dois lados da chapa ao mesmo tempo; (d) equipamento que lapida os quatro lados de uma chapa, simultaneamente; (e) equipamento para cortes, furos e lapidação em peças de formatos diferenciados, onde a água aplicada pelo equipamento sobre a peça é insuficiente para evitar danos, tornando necessária interferência humana para adição de mais água ao processo; (f) processo manual de lapidação, para confecção de peças circulares, totalmente moldadas pelo funcionário operador do maquinário.

Fonte: Cortesia de Viminis, 2011.

Durante o processo de lapidação e polimento, a água é utilizada apenas para amenizar o atrito e a temperatura dos rebolos durante o processo, no intuito de prolongar a durabilidade das peças e evitar que as chapas se quebrem pelo atrito excessivo. No caso da empresa fornecedora do resíduo utilizado neste estudo, a água empregada no processo é reutilizada em mais de 95%.

2.3 Processo de obtenção do resíduo de ETE aplicado neste estudo

Em função da utilização em larga escala de água proveniente da concessionária utilizada no processo de lapidação de vidros planos, notou-se a necessidade da economia deste recurso, não apenas no âmbito financeiro, aspecto importante para a indústria beneficiadora em questão, mas também por uma questão ambiental, visto que, ao redor de todo o mundo, são elaborados recursos que visam racionalizar o uso da água em função de sua característica indispensável à vida no planeta, entendendo que não se trata mais de um recurso 100% renovável em função do aumento populacional e das recentes mudanças climáticas.

No caso adotado para esta pesquisa, a reutilização da água realiza-se da seguinte maneira: água utilizada no processo de lapidação das chapas vidro, acrescido ao vidro desgastado, é despejada em canais que circulam por todo o galpão de manufatura dos vidros. Esta água, juntamente com o resíduo do vidro desgastado, é conduzida por estes canais a tanques de bombas submersas que por sua vez bombeiam a água até um reservatório (figura 2.4), já na porção externa do galpão de processamento de chapas de vidro. Esta água “suja” é bombeada para um primeiro silo, de capacidade igual a 106 m³, onde a ela são adicionados produtos químicos para o processo de decantação na seguinte proporção:

“Granifloc 0.1” – Quantidade: 15l/dia ou 450l/mês. Trata-se de um clarificante alcalino de aspecto incolor, levemente amarelado. Muito solúvel em água, etanol e solventes polares, apresenta teores mínimos de 12% de óxido de alumínio. Fabricante: PiacheFarmoquímica.

“Granifloc AC – Quantidade: 10l/dia ou 300l/mês. Trata-se de um clarificante ácido de aspecto incolor, levemente amarelado. Muito solúvel em água, etanol e solventes

polares e também apresenta teores mínimos de 12% de óxido de alumínio. Fabricante: PiacheFarmoquímica.

Os clarificantes diferem apenas para controle do pH, que deve ser mantido entre 7 e 8.

“Polímero Zt” – Quantidade: utiliza-se 1,6 kg por dia ou 50 kg por mês. Trata-se de um floculante catiônico com a função de aglomerar as partículas, promovendo a separação dos flocos de vidro através de um processo de decantação rápida e floculação do lodo, deixando-o de fácil remoção. É utilizado em forma de pó granulado, de cor branca, muito solúvel em água, porém sua solubilidade é limitada pela viscosidade. Depois de misturado com a água apresenta-se como um gel incolor de textura fina.

Figura 2.4 - Reservatório onde a água proveniente do processo de lapidação é armazenada antes do tratamento



Fonte: Cortesia de Viminis, 2011.

No silo em que ocorre a decantação a água “suja” é acumulada até que transborde (figura 2.5). Neste momento, a água que transborda já não contém flocos de vidro e é levada a um segundo silo. Deste silo, é bombeada de volta para os galpões para ser reutilizada no processo de lapidação das chapas de vidro.

Figura 2.5 - Filtro de decantação de resíduos e o transbordo da água limpa



Fonte: Cortesia Viminias, 2011.

O resíduo que permanece no fundo do primeiro silo onde ocorre a decantação é sugado para um agitador, onde é constantemente misturado para que não endureça (figura 2.6). Este material é gradativamente bombeado para o filtro prensa, que está localizado em uma plataforma mais alta. A partir dali, o material é prensado para que a maior quantidade possível de água seja retirada do resíduo e reaproveitada. No entanto, a água resultante do processo de prensagem retorna ao primeiro tanque e passa novamente por todo o ciclo de purificação, para que se garanta que a água que retorna ao processo esteja efetivamente limpa.

É possível recuperar entre 95 e 97% da água utilizada no processo.

O material resultante do filtro prensa é uma torta de aspecto acinzentado, levemente úmida, contendo entre 3 e 5% de água (figura 2.7). Após a secagem, porém, sua coloração é bem mais clara e apresenta aspecto engessado.

Figura 2.6 - Resíduo proveniente do silo de decantação depositado no tanque agitador, para evitar ressecamento da lama



Fonte: Cortesia Viminis, 2011.

Figura 2.7 - Aspecto do resíduo após a passagem pelo filtro prensa



Fonte: Cortesia Viminis, 2011.

É realizada apenas uma prensagem ao dia, na qual são expelidos 290 kg deste resíduo e, anualmente, 84 toneladas.

Parte deste material é recolhida em algumas vezes por uma empresa de reciclagem, que o utiliza para manufaturar tijolos. Porém, a produção da empresa não dá vazão a todo o material e muito dele é encaminhado a aterros sanitários.

O processo completo descrito anteriormente pode ser expresso pelo fluxograma 2.1.

2.1 - Fluxograma do processo completo de obtenção do resíduo de lapidação de vidro sodo-cálcico utilizado neste estudo.



Fonte: ANTÔNIO, 2011.

2.4 Aplicação do resíduo de vidro na construção civil

Muitos estudos têm sido feitos no intuito de aplicar os mais variados resíduos em materiais de construção. Pesquisas realizadas com resíduos de vidro, no entanto, apresentaram resultados satisfatórios para sua aplicação em finalidades variadas, que seriam benéficas também pelo fato de consumir quantidade significativa do material que seria descartado.

As composições individuais dos vidros são muito variadas, pois pequenas alterações são feitas para proporcionar propriedades específicas, tais como índice de refração, cor, viscosidade, etc. o que é comum a todos os tipos de vidro é a sílica, que é a base do vidro. O vidro destinado à reciclagem apresenta-se na forma de cacos e utensílios como garrafas, embalagens, etc. com cores e dimensões variadas (Koller *et al.*, 2007).

Segundo Shi e Zheng (2007), usando como base sua composição principal, os vidros podem ser classificados sob as seguintes categorias: sílica vítrea, silicatos alcalinos, vidros sodo-cálcicos, vidros de boro-silicato, vidro ao chumbo, vidros de bário e vidros de alumínio silicato. Para conferir a cada um deles as diferenciações de cores anteriormente citadas ou para melhorar suas propriedades específicas,

geralmente são adicionadas pequenas quantidades de aditivos. O tipo de vidro comumente utilizado na construção civil é o vidro sodo-cálcico, que, em massa, representa 80% dos resíduos de vidro e sua composição é de aproximadamente 73% de SiO₂, 13% Na₂O e 10% CaO. Assim, baseado em sua composição química, o vidro sodo-cálcico pode ser utilizado como material cimentício pozolânico¹.

2.4.1 Aplicação do resíduo de vidro em concretos

A utilização de resíduos diversos aplicados ao concreto já foi estudada por vários pesquisadores. Dentre eles o resíduo de vidro moído ou o pó de vidro, que já foram incorporados ao concreto na forma de agregados miúdos, graúdos, *fillers*, como adição ou substituição ao cimento ou areia natural, em muitos casos.

Neste estudo, apenas o pó de vidro é utilizado como substituto ao cimento, mas serão apresentados trabalhos realizados com o pó de vidro, por vezes comparado a outros materiais.

Babu e Prakash (1995) afirmam que o efeito pozolânico do vidro aconteceria com vidros de granulometria menor que 75 mm, uma vez que as partículas finas favorecem rápida e benéfica reação pozolânica. Além dos benefícios relativos ao efeito pozolânico e da mitigação da reação álcali-silica em granulometrias mais finas, constataram em seus estudos que a adição do pó de vidro pode influenciar a qualidade do concreto devido à melhora no empacotamento das partículas, já que promove o preenchimento dos vazios entre os grãos do agregado miúdo.

Shao *et al.* (2000) testaram três situações para a substituição do cimento pelo pó de vidro proveniente de resíduos de lâmpadas fluorescentes com granulometrias de

¹ Mehta e Monteiro (2008) definem a pozolana como um material silicoso ou silico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes. A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada reação pozolânica, cujos produtos são muito eficientes em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência e impermeabilidade do concreto.

Comparação entre o cimento Portland e o cimento Portland pozolânico para que se compreendam os motivos das diferenças em seus comportamentos:

Cimento Portland: $C_3S + H \rightarrow C - S - H$ (reação rápida)

Cimento Portland Pozolânico: Pozolana + CH + H \rightarrow C - S - H (reação lenta)

150µm, 75µm e 38µm. O intuito dos ensaios foi definir a atividade pozolânica do vidro moído, a resistência à compressão nos concretos com 30% de substituição do cimento pelo pó de vidro e a expansibilidade em argamassas contendo o resíduo utilizado. A cinza volante foi utilizada em situações idênticas, em vistas de comparar os resultados obtidos com o pó de vidro. A substituição de 30% do Cimento Portland nos corpos de prova, sendo 15% de sílica ativa e 15% de pó de vidro também foi testada, para que a reatividade entre as substituições minerais fosse observada. Os ensaios foram realizados nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias.

Foi comprovada a atividade pozolânica do pó de vidro com granulometria de 38µm quando se observou que a resistência à compressão dos corpos de prova contendo apenas este resíduo excedeu em 75% o valor recomendado pela ASTM C618, além de exceder em 18% os resultados obtidos com as cinzas volantes. Ainda que a expansão das argamassas com 30% de substituição pelas cinzas volantes e sílica ativa tenha se apresentado menor, as argamassas contendo 30% de pó de vidro apresentaram metade da expansividade quando comparadas ao grupo controle. Nos concretos híbridos, a sílica ativa não apresentou significativa melhoria da atividade pozolânica do pó de vidro, que, conforme o estudo realizado se mostrou viável para a substituição do Cimento Portland em concretos, visto que, comparado à cinza volante, o resíduo vítreo apresentou melhores resultados.

No entanto, em razão da quantidade de silício presente na composição dos vidros de forma geral, a utilização de resíduos de vidro em concretos deve ser feita com precauções. Isso por que existe uma tendência de reação dos álcalis do cimento com a sílica presente no resíduo de vidro moído. Neste mesmo estudo, Shao *et al.* (2000), concluem que o uso do resíduo de vidro em maiores granulometrias, devido à forte reação entre os álcalis do cimento e a sílica reativa do vidro, não foi satisfatório em função do decréscimo de resistência e da expansão excessiva provocadas pelo gel formado em função das reações citadas.

Topçu e Canbaz (2004) estudaram as propriedades em estado fresco e endurecido do vidro triturado como substituto ao agregado graúdo natural em concretos nas proporções de 0%, 15%, 30%, 45% e 60%, em granulometrias que variaram entre 4 e 16 mm. Nos concretos em estado fresco, foram avaliadas a trabalhabilidade,

massa unitária, consistência, teor de ar incorporado, espalhamento e tempo de pega. Não foram observadas mudanças significativas quanto à trabalhabilidade. No entanto, na medida em que aumentaram os teores de vidro triturado, a massa unitária, a consistência e o teor de ar incorporado diminuíram, enquanto o tempo de pega e a fluidez do concreto aumentaram. No estado endurecido, os valores de resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral apresentaram-se inversamente proporcionais aos teores de substituição, chegando a uma redução de até 49% nos corpos de prova com 60% de substituição. Os resultados obtidos demonstraram que o uso do vidro triturado como agregado graúdo não é recomendado, possivelmente devido à sua geometria desfavorável. Os autores sugerem, portanto, a utilização do vidro triturado como agregado miúdo, assumindo que a geometria quase esférica das partículas de tamanho consideravelmente reduzido possa favorecer as propriedades físicas e mecânicas dos concretos.

Um estudo abrangente realizado por Byars *et al.* (2004) avalia o desempenho do resíduo de vidro como substituto tanto ao cimento quanto ao agregado em concretos, analisando 19 produtos com 98 misturas diferentes, fabricados em centrais de concreto no território do Reino Unido e faz especificações quanto ao uso de vidro como pozolana e como agregados miúdos e graúdos em concretos. As peças foram comparadas às normas britânicas, principalmente no que tange à reatividade do vidro aos álcalis do cimento, com avançados ensaios químicos e microscopia eletrônica de varredura. Concluíram em sua pesquisa que os álcalis presentes no cimento exercem a maior influência nos índices de reação álcali-sílica do vidro nos concretos e que a reatividade das partículas de vidro geralmente aumenta quando o tamanho das partículas varia entre 1-2 mm. Partículas menores parecem reduzir a propensão do desencadeamento da reação álcali-sílica. Afirmam, em vista dos fatos explanados, que é a técnica de moagem o fator de maior influência em casos como estes.

Shayan e Xu (2004) realizaram estudos relativos à reciclagem de vidros sodo-cálcicos, incorporando-os a misturas de concreto como material pozolânico. A incorporação do resíduo de vidro foi analisada em diferentes granulometrias, teores e aplicações: como agregado graúdo (entre 12 e 4.75 mm), agregado miúdo (entre 4.75 e 0.15 mm) e *filler* (<10 μ m), simulando a granulometria de agregados naturais,

no caso dos dois primeiros. Teores de 0 a 100% de substituição de agregados por vidro foram testados em relação à expansão e à resistência mecânica. Tanto para agregados graúdos como para agregados miúdos, a substituição de até 30% dos agregados por vidro não apresentou reações deletérias ao concreto. Análises relativas às propriedades dos concretos em estado fresco e endurecido permitiram concluir que a substituição de até 50% do agregado graúdo e miúdo pelo vidro triturado é possível para fins estruturais e não estruturais. Com a incorporação do pó de vidro ao concreto observaram-se melhorias na resistência mecânica dos corpos de prova testados, comprovando, inclusive por análises microestruturais que a incorporação do pó de vidro não provoca por si só expansões prejudiciais, uma vez que produz uma matriz densa, capaz de melhorar as propriedades relativas à durabilidade e concluíram que a incorporação de 30% do pó de vidro como cimento poderia ser aplicada a concretos de até 32 Mpa, vislumbrando a substituição de adições de maior custo como a sílica ativa e a cinza volante pelo pó de vidro. Porém, os autores esclarecem que estudos mais aprofundados devem ser realizados neste aspecto.

Bem como outros autores já citados, visando comprovar a viabilidade técnica da utilização de vidro não reciclado como material agregado ao concreto para fins estruturais, Lopez *et al.* (2005) desenvolveram um estudo específico de comparação da influência deste material granulometrias diferenciadas nas propriedades mecânicas de concretos fabricados, que abrangeu três etapas. Em todas as etapas, a relação a/c foi mantida. Na primeira etapa, o agregado miúdo natural (areia) foi substituído em 5% por vidro moído nas faixas granulométricas que compreendem de 0 – 0,15 mm; 0,15 – 0,30 mm e 0,30 – 0,60 mm. Para a segunda etapa, por demonstrar melhor resultado de resistência à compressão na primeira etapa (21% superior ao concreto referência), foi eleita a faixa granulométrica de 0,15 – 0,30 mm do vidro moído para substituir em massa 5, 10, 15 e 20% do agregado miúdo natural. Notou-se uma correlação diretamente proporcional entre o aumento do teor de substituição e a resistência à compressão (valor 57% superior ao concreto referência). A terceira série de ensaios determinou a influência da adição do vidro moído na mesma granulometria em teores de 5, 10, 15 e 20% sobre a massa do agregado miúdo natural no que tange à resistência à compressão. Notou-se que na

medida em que o teor de adição de vidro aumentou, a resistência dos corpos de prova diminuiu. Entretanto, apresentaram-se maiores que as resistências obtidas com os corpos de prova sem adição de vidro. Apesar de sugerir pesquisas mais abrangentes em relação ao potencial global da utilização do vidro moído como material agregado ao concreto, a pesquisa realizada por Lopez *et al.* (2005) demonstra viabilidade técnica da aplicação do material estudado em concretos com a finalidade de substituir agregados miúdos naturais.

Constata-se ainda, que para que uma consistência similar aos concretos sem adição de resíduos de vidro fosse mantida, seria necessário que mais água fosse adicionada à mistura com agregados de vidro moído. Afirmam que a utilização do resíduo de vidro moído como agregado miúdo demanda uma quantidade maior de água do que o agregado miúdo natural, devido ao aumento da superfície a ser hidratada em função do aumento de partículas finas dentro do agregado miúdo.

Apenas para que se entenda o potencial de utilização do vidro finamente moído como material pozolânico cita-se o estudo realizado por Shi *et al.* (2005), que, ainda que aplicado como substituto ao cimento Portland em cubos de argamassas e não em concretos, como no caso deste estudo, o vidro moído em diferentes granulometrias foi avaliado quanto às características pozolânicas e os resultados obtidos foram comparados com experimentos semelhantes realizados com a incorporação de cinzas volantes nas mesmas proporções. Comprovou-se que quanto mais finas forem as partículas de vidro, maior sua atividade pozolânica. A opção pela cura acelerada por altas temperaturas potencializou a atividade pozolânica em ambos os casos. No entanto, a resistência à compressão das argamassas apresentou melhores resultados nos corpos de prova contendo vidro moído. Os autores concluíram que a substituição parcial do Cimento Portland pelo vidro moído não apenas é viável como também promove a redução de reações álcali agregado. Neste aspecto, porém, mostra-se menos eficaz que as cinzas volantes.

Estudos realizados por Terro (2006) utilizam o vidro como agregados graúdo e miúdo, triturados de acordo com a granulometria de agregados naturais corriqueiramente utilizados para concretos e estes foram submetidos a temperaturas de até 700°C. Substituições entre 0 e 100% do cimento Portland por vidro cominuído

foram testadas e as propriedades dos concretos frescos e endurecidos foram avaliadas. Notou-se em condições de elevada temperatura a redução de até 20% da resistência à compressão em relação às misturas controle em que eram utilizadas granulometrias diversas. Os concretos produzidos com o resíduo de vidro moído com teores de substituição correspondentes a 10%, tanto em granulometrias maiores quanto menores, apresentaram melhores resultados quanto às propriedades dos concretos em estado fresco e endurecido. Os concretos produzidos com o vidro moído mais finamente apresentaram valores de resistência à compressão maiores que os concretos produzidos com o vidro incorporado em partículas maiores, tanto para a cura em temperaturas elevadas como em temperatura ambiente.

Bardini e Marchioro (2007) realizaram um estudo exploratório no intuito de utilizar o vidro moído como parte do agregado miúdo natural (areia) em proporções de 0, 5, 10, 15 e 20% e granulometria entre 0,15 – 0,03 mm para a produção de concretos, objetivando, além da reutilização do material que seria descartado, obter melhores resultados relativos à resistência mecânica dos concretos nas idades de 7 e 28 dias. No que concerne à resistência à compressão, exceto pelo traço contendo 20% de substituição do cimento pelo pó de vidro, todos os traços atingiram valores médios superiores aos concretos referência. Destes, o melhor desempenho foi observado nos concretos com 5% de substituição, que atingiu resistência média 40% superior ao concreto sem teores de substituição. Os autores afirmam que o aumento significativo da resistência à compressão possa ser atribuído ao preenchimento dos vazios do concreto pelo vidro moído. No entanto, sugerem estudos aprofundados em relação às reações álcali-sílica do vidro com o concreto e à efetiva atividade pozolânica do resíduo aplicado.

Uma compilação feita por Shi *et al.* (2007) reúne estudos realizados entre os anos de 1995 e 2005 e resume os progressos alcançados na aplicação do resíduo de vidro moído como agregados graúdos e miúdos, substituição do cimento em concretos e produção do cimento Portland e aponta usos apropriados do mesmo para tais finalidades. Afirma, através deste resumo, que a utilização do vidro moído como agregados apresenta moderada influência negativa na trabalhabilidade e resistência dos concretos, mas que a preocupação maior ainda é relativa às reações

de expansibilidade e fissuração dos concretos onde é aplicado o resíduo em questão. No que tange ao uso como matéria prima para a produção de cimentos como fonte de sílica, recomenda a utilização de quantidades pequenas, no intuito de minimizar o conteúdo líquido do clínquer, resultado da formação de componentes sódicos, o que aumentaria a quantidade de álcalis do cimento. Por fim, confirma que devido à significativa atividade pozolânica do pó de vidro, este pode substituir o cimento em concretos, dependendo da proporção adotada.

As pesquisas realizadas por Pinto *et al.* (2008) propuseram, bem como outros autores estudados, a substituição do cimento por vidro moído com granulometria média de 10 μ m, em teores de 0, 10, 20 e 30% em massa, além da avaliação da potencial reatividade álcali-agregado devido à presença do agregado tipo gravaca, de natureza sedimentar e conhecidamente reativo. Avaliou-se o efeito pozolânico do vidro através de ensaios de resistência à compressão e da expansão causada pela reação álcali-agregado nas idades de 3, 7 e 28 dias. Nas idades de 3 e 7 dias, nenhum dos corpos de prova superou em valores absolutos a resistência apresentada pela mistura referência. No entanto, na idade de 28 dias, notou-se um pequeno aumento no valor absoluto da resistência à compressão nas misturas com teor de 10% de substituição quando comparadas à mistura referência, enquanto os outros teores apresentaram decréscimos consideráveis (entre 5,5 e 14,1%). Apesar disso, os autores consideram bons os resultados obtidos no que tange às propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados.

Pinto *et al.* (2008) não verificaram com este estudo a estabilização das reações de expansão dos corpos de prova no tempo considerado para os ensaios. Observaram, no entanto, que os maiores teores de substituição apresentaram menores índices destas reações.

De acordo com ensaios realizados por Ismail e Al-Hashmi (2009) em concretos com 0, 10, 15 e 20% de substituição do agregado miúdo natural pelo vidro finamente moído, a reação pozolânica do material atingiu 80% aos 28 dias de cura. Neste ponto, a resistência à compressão foi maior do que nos corpos de prova de controle na mesma idade. Foi observado aumento na resistência à compressão por tração diametral e na resistência a compressão axial em relação à mistura controle. No

entanto, também foi constatada diminuição da trabalhabilidade dos concretos na medida em que maiores teores eram utilizados. Os corpos de prova que continham 20% de substituição apresentaram queda de aproximadamente 30% nos testes de abatimento de tronco de cone.

Kou e Poon (2009) realizaram estudos com substituições de 10, 15 e 20% de agregado graúdo por resíduos de vidro em uma primeira etapa de ensaios. Em um segundo momento, cinzas volantes foram adicionadas aos concretos, utilizando, porém, as mesmas proporções de substituição relativas ao resíduo de vidro, no intuito de investigar o potencial de mitigação das possíveis reações álcali-sílica. A substituição proporcionou redução das propriedades mecânicas na medida em que os teores de substituição aumentaram. Sugerem, no entanto, que tal resultado possa ser em virtude da diferença de densidade do vidro, da areia natural e do granito, visto que as reações deletérias provocadas pelas partículas graúdas de vidro em função da reação álcali-sílica foram consideravelmente reduzidas com a adição de cinzas volantes ao concreto.

Grande *et al.* (2009) apresentaram um estudo de caracterização de três dosagens de concretos: traço referência, concretos com 20% de substituição do cimento Portland e concretos com 20% de substituição da areia por vidro triturado. Em estado fresco, os concretos foram caracterizados conforme sua consistência, obtida por ensaio de abatimento de tronco de cone de Abrahms. A resistência à compressão e a absorção de água por imersão foram avaliadas nos concretos endurecidos nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias. As faixas granulométricas adotadas para o vidro foram de 0,6 e 1,2 mm para a substituição parcial do agregado miúdo e para a substituição parcial do cimento foram adotadas granulometrias abaixo de 0,075 mm. A relação a/c foi mantida para que a consistência fosse avaliada. Este ensaio demonstrou quedas no abatimento dos concretos em relação ao traço referência, sendo que os concretos com substituição parcial do cimento apresentaram menor queda que os concretos com substituição parcial de areia por vidro triturado. A substituição parcial do cimento Portland mostrou-se inviável no teor de 20% em função da ausência de atividade pozolânica. Já a substituição parcial do agregado miúdo pelo vidro triturado melhorou a distribuição granulométrica e diminuiu o índice de vazios da mistura granular, fato comprovado pelo ensaio de absorção de água,

analisada apenas nos concretos com idade de 28 dias. Conseqüentemente, o concreto híbrido atingiu melhoria na resistência mecânica em relação ao traço referência na idade de 28 dias.

A resistência à compressão de concretos com substituição do agregado miúdo por frações de sucata de vidro moída também foi avaliada por Barroso *et al.* (2010) nas idades de 14 e 28 dias. Neste estudo foram feitas substituições parciais 0, 25, 50, 75 e de até 100% da areia pelo vidro moído com granulometria de 4,8 mm. Diferentemente dos estudos analisados anteriormente neste trabalho, Barroso *et al.* (2010) utilizam um teor de aditivo plastificante de 0,75% em massa. Todos os traços apresentaram resistência à compressão inferior ao traço referência. No entanto, aos 28 dias, apenas o traço com teor de 75% de substituição do agregado miúdo por vidro moído apresentou resistência abaixo do valor adotado para o estudo realizado, que foi de 30 MPa, permanecendo, porém, dentro do desvio padrão estipulado, de 3 MPa. Concluíram, portanto, que os valores médios das resistências obtidas permitem afirmar que a utilização de até 50% de vidro moído em substituição ao agregado miúdo natural na produção de concretos é possível.

Em vista da grande quantidade de resíduos de vidro temperado gerada na cidade de Manaus e das dificuldades de obtenção de agregado graúdo para a produção de concretos na região, Oliveira *et al.* (2010) desenvolveram um estudo que se utiliza das propriedades da matriz cimentícia, no que diz respeito ao encapsulamento, para a produção de compósitos, uma vez que a elevada resistência à compressão do resíduo e a forma granular cúbica ou paralelepípedica característica com que as placas de vidro temperado se rompem apresenta-se como uma alternativa para suprir a deficiência crônica do agregado graúdo para a produção de concretos, além de minimizar o impacto ambiental negativo proveniente do descarte do resíduo. O atendimento às exigências normativas para sua utilização como agregado graúdo foi confirmado por ensaios de determinação de densidade, massa específica unitária e granulometria. A avaliação da interação entre o resíduo de vidro temperado e a matriz cimentícia do concreto foi feita através dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Na região de Manaus, o agregado graúdo utilizado

convencionalmente é o seixo, de módulo de finura 6,53 e diâmetro máximo de 19 mm, que foi aplicado no concreto referência. No estudo em questão, foram adotadas duas faixas granulométricas do resíduo de vidro temperado: entre 4,8 e 9,5 mm e entre 9,5 e 19 mm. Para formar a massa total de agregado graúdo, as faixas granulométricas foram misturadas em proporções de 55% para a menor granulometria e de 45% para os resíduos de maior granulometria, buscando a melhor densidade da mistura. Os resultados obtidos para a trabalhabilidade, consistência, índice de vazios, massa específica e determinação de absorção de água por imersão foram considerados bons quando comparados ao concreto referência, produzido com seixo. A substituição total do agregado graúdo de seixo pelo resíduo de vidro temperado nos concretos apresentou resultados muito próximos ao concreto produzido unicamente com seixo quando se trata da resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, e, ainda que, comparativamente ao concreto referência, a aderência do resíduo à matriz cimentícia do concreto tenha apresentado sensível redução, sua distribuição apresentou-se boa nesta porção do concreto. Afirma-se, portanto, a viabilidade da aplicação do resíduo de vidro temperado para a produção de concretos com fins estruturais.

O estudo apresentado nesta dissertação utiliza o resíduo de vidro proveniente da ETE de uma indústria beneficiadora de vidros sodo-cálcicos, onde as chapas de vidro são temperadas apenas após o processo de lapidação. No entanto, é importante esclarecer que não há diferenças quanto à composição química do vidro sodo-cálcico comum e do vidro temperado, visto que o tratamento relativo ao processo de têmpera para conferir maior resistência e durabilidade ao vidro envolve choques térmicos sucessivos. Como citado anteriormente neste mesmo capítulo, antes de sofrer o processo de têmpera, o vidro sodo-cálcico é 100% reciclável se não houver nenhum tipo de contaminação. Porém, após ser temperado, o vidro não serve mais para ser reciclado como vidro e é geralmente destinado a aterros sanitários.

Idir *et al.* (2010) promoveram estudos para o uso de pó de vidro como inibidor de reações álcali-silica na interação com cimentos, atuando como material pozolânico. Foram utilizadas partículas de vidro de até 1mm sem que nenhuma reação deletéria

fosse detectada. Observou-se, com a realização de testes complementares, que quanto mais finas forem as partículas, menor será a expansão dos corpos de prova, pois estas partículas surtirão efeito pozolânico sobre as argamassas. Idir *et al.* (2010) enumeram mecanismos que poderiam explicar a eficácia das pozolanas contra a reação álcali-sílica:

- diluição dos álcalis do concreto quando pozolanas de baixa alcalinidade são utilizadas como substitutas ao cimento;
- a porosidade do cimento é capaz de acomodar o gel gerado pela reação álcali-sílica, qualquer que seja sua natureza, sem causar expansão. Quanto maior for a porosidade da pasta, mais espaço o gel terá para ocupar, sem provocar inchaço da estrutura.
- a diminuição da permeabilidade do concreto e da mobilidade iônica, levando à redução da migração de álcalis em direção aos agregados reativos. De fato, o uso de agregados finos de vidro leva à formação de silicato de cálcio hidratado por meio da reação pozolânica, provocando aumento da densidade da estrutura da pasta de cimento e levando à diminuição da porosidade e da permeabilidade, além do aumento significativo da resistência do concreto e diminuição da expansão, confirmando o efeito benéfico da reação pozolânica.

Conforme mencionado no capítulo 1, resultados de estudos onde um resíduo de mesma procedência que o resíduo aplicado no presente trabalho foi utilizado em argamassas cimentícias foram recentemente publicados. Na verdade, pertencem à mesma linha de pesquisa, da Universidade Federal de Uberlândia, no estado de Minas Gerais.

Salomão *et al.* (2010) desenvolveram tal estudo com os objetivos de verificar a possibilidade de redução da quantidade de cimento, substituindo o aglomerante pelo pó de vidro e investigar, paralelamente, seu emprego como adição em argamassas, mantendo-se o consumo de cimento nesta última hipótese. O traço de 1:4 de cimento e areia foi adotado por permitir ajustes para futuros ensaios em concretos. Além do traço referência (traço 1), foram produzidos mais três traços, estes com o resíduo, de granulometria 0,075mm. Um dos traços previa a substituição de 5% em massa do cimento pelo resíduo (traço 2) e os outros dois mantinham o traço

referência, mas possuíam 10 e 20% de adição do resíduo (sendo nomeados traço 3 e traço 4, respectivamente), também em relação à massa de cimento. Ensaios para determinação do índice de consistência e retenção de água foram realizados nas argamassas em estado fresco. Observações quanto à trabalhabilidade permitiram afirmar que as argamassas com teores de 5% de substituição e 10% de adição apresentaram melhoria em relação ao traço referência, menos trabalhável até que a argamassa com adição de 20% de resíduo. O índice de consistência das argamassas de traço 3 e 4 foi consideravelmente maior que dos traços 1 e 2, que apresentaram resultados muito próximos. Esta mesma ordem e proporção de resultados repete-se nos ensaios de retenção de água. Os ensaios em estado endurecido, de absorção de água por capilaridade e resistência à compressão, ocorreram apenas na idade de 28 dias. A maior absorção de água por capilaridade dos traços com adição de resíduo à mistura apresentou maiores resultados e potencializou o surgimento de eflorescências no topo dos corpos de prova. Não houve melhoria ou prejuízo no que diz respeito à resistência das argamassas com o pó de vidro.

Araújo *et al.* (2011) deram continuidade aos estudos de Salomão *et al.* (2010), verificando as atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro (de mesma origem do estudo que a este antecede), utilizando, para tanto, em vez do cimento CP II E 32, o cimento Portland CPV ARI (sem adições). Partindo dos resultados obtidos por Salomão *et al.* (2010), os autores supuseram que o resíduo, muito fino, incrementaria a resistência mecânica por meio do efeito *filler*, que, sendo um fenômeno físico, não sofreria interferência pela opção do processo de cura a quente, que evidenciaria possíveis reações pozolânicas nas argamassas. Visando evitar o aparecimento de eflorescências, experimentaram submeter o resíduo a uma pré-lavagem, supondo a eliminação dos agentes flocculantes apontados no estudo anterior como causa para o surgimento de eflorescências no topo dos corpos de prova. No estudo de Araújo *et al.* (2011) foi adotada a proporção 1:3 de cimento e areia média para o traço 1 e, para o traço 2, a mesma proporção, mas com 10% de substituição do cimento em massa por pó de vidro e areia média. Para efeito de comparação, os corpos de prova testados foram separados em dois lotes após a cura convencional por imersão em água em temperatura ambiente por 7 dias: por

mais 7 dias, metade dos corpos de prova de cada traço foi mantida em condições de cura convencional e a outra metade foi submetida ao processo de cura térmica pelo mesmo período de tempo. Concluiu-se a possibilidade do uso deste resíduo industrial como material pozolânico. Apenas nas argamassas com pó de vidro submetidas à cura térmica observou-se aumento na resistência à compressão. As eflorescências presentes nos corpos de prova produzidos por Salomão *et al.* (2010), não foram visualmente percebidas nos corpos de prova de Araújo *et al.* (2011).

Nos corpos de prova dos concretos produzidos para os ensaios desta dissertação, não foram observadas eflorescências de nenhum tipo, mesmo tendo transcorrido mais de um ano da data da moldagem dos primeiros corpos de prova.

O trabalho realizado por Silva *et al.* (2011) avalia a viabilidade de utilização de vidro como substituto total ou parcial do agregado miúdo natural (areia) para a produção de concretos, como forma de destinação para a grande quantidade de resíduo vítreo gerado no arquipélago de Fernando de Noronha, visto que a localidade apresenta dificuldades de acesso e, conseqüentemente, de remoção deste material. O programa experimental consistiu na produção de três famílias de amostras, sendo uma com 100% de substituição do agregado miúdo pelo pó de vidro, a segunda com 50% de substituição do agregado natural pelo pó de vidro e uma última, de concretos referência, com 100% de agregado natural. Os parâmetros avaliados para os concretos produzidos foram a consistência da mistura em estado fresco e a resistência à compressão no estado endurecido nas idades de 7 e 28 dias. O agregado graúdo utilizado possui natureza quartzosa e o pó de vidro foi triturado em moinho de martelo, de modo que se obtivessem as características granulométricas da areia natural, com diâmetro máximo de 4,8 mm e módulo de finura de 2,76.

Os resultados obtidos por Costa e Silva *et al.* (2011) demonstraram aumento na consistência e redução da densidade nos concretos com maiores teores de pó de vidro. Os ensaios de resistência à compressão revelaram resultados melhores nos concretos sem adição de pó de vidro. A redução da diferença entre os resultados dos concretos com substituições entre as idades de 7 e 28 dias é significativa. Contudo, os resultados obtidos para os concretos com 50% de substituição do agregado miúdo natural pelo pó de vidro indicaram a possibilidade de sua aplicação

para fins estruturais. Os concretos com 100% de substituição apresentaram os menores valores de resistência, mas sua utilização para concretos sem finalidade estrutural ou concretos massa foi considerada viável. Os autores sugerem estudos futuros quanto à durabilidade dos concretos e a variabilidade da relação a/c como forma de simulação de ambientes de diferentes graus de agressividade. É importante destacar que o estudo apresenta resultados positivos quanto à garantia da viabilidade do procedimento, não apenas por apontar soluções relativas à disposição inadequada do resíduo no arquipélago, mas também como forma de redução de custos relativos ao transporte dos resíduos para o continente, onde os custos de sua destinação final seriam igualmente mitigados.

Há que se investigar ainda de forma mais aprofundada a durabilidade dos concretos produzidos com o resíduo de vidro em seus usos variados (como agregados, *filler*, pozolana, dentre outros), mas o que foi possível constatar a partir dos estudos realizados neste campo é que o pó de vidro pode ser utilizado sem riscos de desencadear reações deletérias de expansibilidade quando em granulometrias menores que 0,30 mm. Sua utilização como aglomerante também não apresentou desvantagens às propriedades mecânicas dos concretos quando quantidades controladas, entre 10 e 15%, são utilizadas em substituição à massa de cimento. Entretanto, a constatação de redução da trabalhabilidade em função de maiores quantidades de resíduo nos concretos sugere o controle da relação a/c ou o emprego de aditivos, visto que o aumento da absorção de água pelos sistemas cimentícios dificultaria o trabalho de moldagem de grandes estruturas, inviabilizando sua aplicação na indústria da construção civil.

Capítulo 3

Programa Experimental

3. Programa Experimental

No capítulo 2 foi apresentada a revisão bibliográfica como fundamentação teórica, procurando embasar cientificamente e tecnicamente esta dissertação.

O programa experimental apresentado neste estudo foi realizado, em sua maioria, no Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo. Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados no Instituto Federal do Espírito Santo.

A elaboração deste estudo tem o intuito de avaliar as possibilidades de substituição parcial do cimento pelo resíduo de ETE de indústrias beneficiadoras de vidros sodo-cálcicos em concretos e a analisar a possibilidade de sua aplicação para fins estruturais na indústria da construção civil.

Os corpos de prova foram elaborados conforme a normatização vigente, simulando e avaliando, dentro das possibilidades, os esforços sofridos pelas estruturas.

Assim, este capítulo apresenta a definição das variáveis, os materiais, os concretos e os corpos-de-prova adotados, assim como também expõe os métodos utilizados para a obtenção dos resultados, visando atingir os objetivos propostos.

A metodologia envolveu primeiramente ensaios de caracterização das pastas cimentícias, determinação de expansibilidade pelo método das agulhas de Le Chatelier e tempo de pega. Em um segundo momento, foram caracterizados os concretos nos estados fresco e endurecido. Foram realizados ensaios de determinação de consistência, massa específica, exsudação de água e teor de ar incorporado para os concretos em estado fresco e ensaios de resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, além do módulo de elasticidade à compressão para os concretos em estado endurecido.

Foram analisadas imagens da microestrutura dos concretos produzidos através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Por fim, os resultados foram estatisticamente analisados no intuito de definir efetivamente a intensidade das influências individuais ou da interação dos fatores constantes e controláveis nos resultados obtidos.

3.1 Planejamento do programa experimental

Segundo Ribeiro e Caten (2010), o projeto de experimentos tem sido aplicado virtualmente em todas as áreas de conhecimento. Inicialmente aplicada a experimentos na área da agricultura, foi introduzida por Fischer, em 1935. Trata-se de uma metodologia embasada principalmente em conceitos estatísticos, destinada a aperfeiçoar o planejamento, execução e análise de um experimento, no intuito de permitir a estruturação de uma sequência de ensaios e traduzir os objetivos previamente estabelecidos pelo pesquisador.

Nesta dissertação, o planejamento do experimento permitiu quantificar e qualificar os parâmetros, a forma de amostragem e o tratamento dado a cada material a ser

caracterizado, além de determinar a forma e a sequência de execução dos ensaios necessários à afirmação ou rejeição das hipóteses relativas ao projeto proposto.

O programa experimental aqui descrito foi desenvolvido visando atingir os objetivos preconizados nesta dissertação. Como parâmetros para tal processo, Ribeiro e Caten (2010) definem todas as variáveis da linha de produção que podem ser alteradas e que talvez tenham um efeito sobre as variáveis de resposta, onde os fatores constantes e os fatores controláveis formam subconjuntos.

3.1.1 Variáveis do programa experimental

3.1.1.1 Fatores constantes

Neste estudo, os fatores constantes adotados foram a relação a/c , substituída nos outros traços por a/ag (água/cimento acrescido da porcentagem de substituição do cimento pelo resíduo), no intuito de avaliar a trabalhabilidade dos concretos estudados. Também os procedimentos de cura dos concretos e preparação e moldagem dos corpos de prova foram os mesmos para todos os traços avaliados, bem como a origem dos materiais. São parâmetros que não serão estatisticamente analisados por não causarem variações na comparação dos sistemas.

3.1.1.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis foram os percentuais de resíduo de ETE acrescidos nas proporções de 0, 5, 10, 15 e 20% em relação à massa de cimento e as idades de cura dos concretos, que foram de 3, 7 e 28 dias, bem como a trabalhabilidade, a consistência, a massa específica, a exsudação e o teor de ar incorporado dos concretos em estado fresco, além da resistência à compressão axial, a tração por compressão diametral e o módulo de elasticidade dos concretos em estado endurecido. Serão os parâmetros estudados a vários níveis do processo experimental. A definição dos índices de substituição utilizados nesta pesquisa foi estabelecida com base em estudos realizados anteriormente por Arruda *et al.* (2001)

e Ismail e Al-Hashmi (2009), por buscarem resultados similares com materiais de propriedades semelhantes.

3.1.1.3 Variáveis de resposta

As variáveis de resposta são relativas às propriedades físicas e mecânicas dos concretos avaliados, sendo mensuráveis e quantitativas, abrangendo, portanto, os resultados obtidos nos ensaios de determinação de consistência, massa específica, exsudação de água e teor de ar incorporado realizados nos concretos em estado fresco e nos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, realizados nos concretos em estado endurecido.

3.2 Apresentação geral do experimento

Tendo em vista as variáveis adotadas, diferentes combinações foram geradas para os ensaios de cada etapa do programa experimental. Para a análise das pastas cimentícias, foram geradas 80 combinações, a saber: cinco ensaios para a determinação de expansibilidade pelo método das agulhas de Le Chatelier, sendo que cada ensaio envolveu três agulhas, cada uma preenchida com um dos cinco traços propostos, que resultaram em 75 combinações. Para os ensaios de determinação de tempo de pega, foram utilizadas apenas 5 combinações, pois cada traço foi submetido a um ensaio apenas. Em ambos os ensaios, a interação entre a porcentagem de resíduo das pastas cimentícias e o tempo transcorrido para a realização dos ensaios é o fator de maior influência na variável de resposta. O projeto fatorial completo da etapa relativa aos ensaios para avaliação das propriedades das pastas cimentícias produzidas com diferentes teores de resíduo de ETE visa demonstrar a quantidade de ensaios e suas interações. Entretanto, ao final dos ensaios para determinação de expansibilidade das pastas cimentícias, pequenos cilindros medindo 30 mm de diâmetro e 30 mm de altura, que foram posteriormente rompidos manualmente para a retirada de amostras para a análise microestrutural.

Outras 20 combinações foram determinadas para o estudo dos concretos no estado fresco, a saber: quatro ensaios foram realizados para cada um dos cinco traços de concreto em momentos imediatos à finalização de sua produção, quando era iniciada a moldagem dos corpos de prova para os ensaios em concretos endurecidos.

Tabela 3.1 - Representação do projeto fatorial relativo aos ensaios realizados com os concretos em estado fresco

Fatores	Nº níveis	Níveis	Unidade	Nº variáveis de resposta	Variáveis de resposta
% resíduo	5	0, 5, 10, 15 e 20	%	1	consistência
% resíduo	5	0, 5, 10, 15 e 20	%	1	massa específica
% resíduo	5	0, 5, 10, 15 e 20	%	1	exsudação de água
% resíduo	5	0, 5, 10, 15 e 20	%	1	teor de ar incorporado

Projeto fatorial:

Cálculo para ensaio de determinação da consistência por abatimento de tronco de cone:

$$5 \times 1 = 5 \quad (a) \longrightarrow (n^{\circ} \text{ níveis } \% \text{ resíduo} \times n^{\circ} \text{ variáveis de resposta})$$

Cálculo para ensaio de determinação de massa específica pelo método pressométrico:

$$5 \times 1 = 5 \quad (b) \longrightarrow (n^{\circ} \text{ níveis } \% \text{ resíduo} \times n^{\circ} \text{ variáveis de resposta})$$

Cálculo para ensaio de determinação de quantidade de água exsudada:

$$5 \times 1 = 5 \quad (c) \longrightarrow (n^{\circ} \text{ níveis } \% \text{ resíduo} \times n^{\circ} \text{ variáveis de resposta})$$

Cálculo para ensaio de determinação de teor de ar incorporado:

$$5 \times 1 = 5 \quad (d) \longrightarrow (n^{\circ} \text{ níveis } \% \text{ resíduo} \times n^{\circ} \text{ variáveis de resposta})$$

Cálculo para nº total de ensaios realizados nos concretos em estado fresco:

$$(a) + (b) + (c) + (d) = n^{\circ} \text{ total de ensaios realizados nos concretos em estado fresco}$$

$$\longrightarrow (a) + (b) + (c) + (d) = 5 + 5 + 5 + 5 = 20 \text{ ensaios}$$

Fonte: ANTÔNIO, 2011.

A demonstração do projeto fatorial dos ensaios relativos aos concretos em estado fresco constante da tabela 3.1 visa apenas apresentar os ensaios realizados no que diz respeito a um dos fatores controláveis (no caso, o percentual de substituição do cimento pelo resíduo de ETE), afinal, não há análise direta de possíveis interações, visto que a intenção dos ensaios é conhecer as propriedades dos concretos em estado fresco e a variação de acordo com os diferentes teores de resíduos adotados. Entretanto, é importante destacar que os resultados obtidos são importantes, principalmente quando as propriedades físicas e químicas são

conjuntamente analisadas, para que, eventualmente, uma conclusão concisa e bem embasada seja feita a respeito da aplicação do resíduo como substituto parcial do cimento Portland CPV ARI RS em concretos.

O estudo dos concretos em estado endurecido envolveu 60 combinações, conforme o seguinte procedimento: quatro corpos de prova de cada uma das três idades, de cada um dos cinco teores de substituição determinados foram rompidos para a determinação da resistência à compressão axial e o mesmo procedeu-se para a determinação da resistência à tração por compressão diametral. Para os ensaios de determinação de módulo estático de elasticidade à compressão, foram utilizados cinco corpos de prova de cada um dos concretos com cinco diferentes teores de substituição. Como o ensaio envolve o rompimento não relatado de dois corpos de prova para correlação da resistência à compressão axial relativa aos três corpos de prova efetivamente ensaiados para a obtenção do módulo estático de elasticidade à compressão, as tabelas B.3.1 a B.3.5 constantes do Apêndice B deste trabalho apresentam apenas os resultados relativos ao módulo estático de elasticidade à compressão. O experimento exigiu a produção de 145 corpos de prova de traços variados, pois avalia a interação entre a porcentagem de resíduo utilizada em cada traço de concreto estudado e a idade dos corpos de prova ensaiados, sendo os resultados dos ensaios realizados, as variáveis de resposta. De posse destes dados, foi possível estabelecer o número total de corpos de prova utilizados através de um projeto fatorial cruzado completo, demonstrado na tabela 3.2.

Os ensaios procederam-se aleatoriamente, porém, os maquinários utilizados e operadores mantiveram as mesmas sistemáticas.

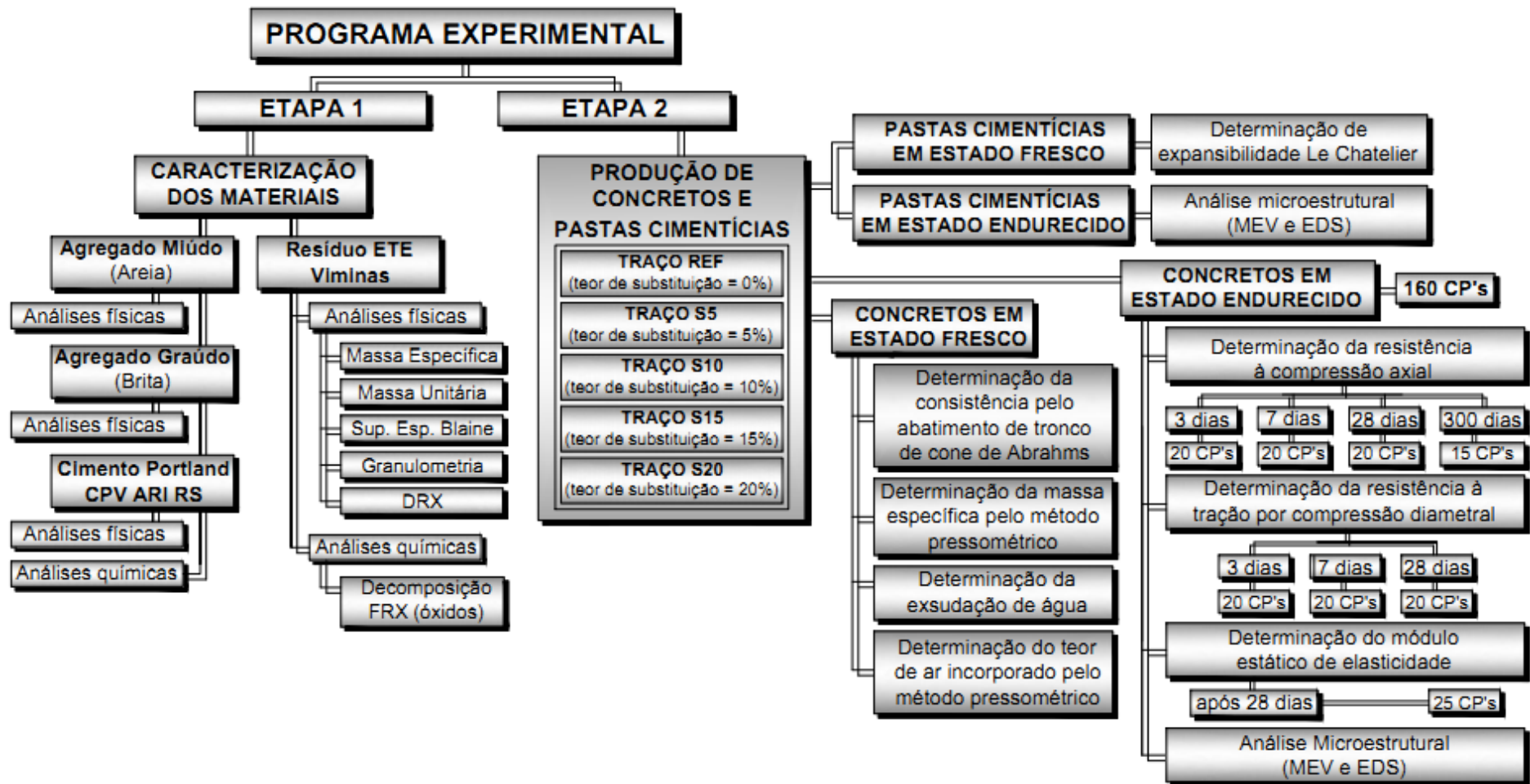
O resíduo coletado foi submetido a uma série de testes, a fim de determinar suas propriedades químicas, físicas, e microestruturais. A figura 3.1 apresenta um organograma das fases de caracterização dos materiais avaliados e o programa experimental das pastas cimentícias e dos concretos estudados.

Tabela 3.2 - Representação do projeto fatorial cruzado completo dos ensaios realizado com os concretos em estado endurecido

Representação do projeto fatorial cruzado completo para os ensaios nos concretos em estado endurecido para determinação das resistências à compressão axial, à tração por compressão diametral e ao módulo estático de elasticidade					
Fatores	Nº níveis	Níveis	Unidade	Nº variáveis de resposta	Variáveis de resposta
% resíduo	5	0, 5, 10, 15 e 20	%	2	Fc* e Ftd**
idade	3	3,7 e 28	dias	-	-
Possíveis interações:					
% resíduo x idade					
Fatores	Nº níveis	Níveis	Unidade	Nº variáveis de resposta	Variáveis de resposta
% resíduo	5	0, 5, 10, 15 e 20	%	1	Ec***
idade	1	mais de 28	dias	-	-
Possíveis interações:					
% resíduo x idade					
Projeto fatorial cruzado completo:					
Cálculo para ensaios de determinação das resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral realizados em todas as idades:					
$5 \times 3 \times 2 \times 4 = 120$ (a) \longrightarrow (nº níveis % resíduo x nº níveis idade x nº variáveis resposta x nº corpos de prova)					
Cálculo para ensaio de determinação de módulo estático de elasticidade após a idade de 28 dias:					
$5 \times 1 \times 1 \times 5 = 25$ (b) \longrightarrow (nº níveis % resíduo x nº níveis idade x nº variáveis resposta x nº corpos de prova)					
Cálculo para número total de corpos de prova					
(a) + (b) = nº total de corpos de prova $\longrightarrow 120 + 25 = 145$ corpos de prova					
Nota:					
* Fc = Resistência à compressão axial					
** Ftd = Resistência à tração por compressão diametral					
*** Ec = Módulo estático de elasticidade					

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 3.1 – Organograma da caracterização dos materiais, princípio do programa experimental



Fonte: Acervo Pessoal

3.3 Materiais e métodos

O procedimento experimental deste estudo visa avaliar a aplicabilidade dos subprodutos resultantes de uma estação de tratamento de efluentes provenientes da lapidação do vidro plano beneficiado em concretos e avaliar suas propriedades como substituto a parte da massa de cimento em concretos convencionais.

Os materiais utilizados e os métodos aplicados foram selecionados de modo a atender a normatização brasileira referente a cada uma das características e metodologias de ensaios exigidas, no intuito de tornar válido o estudo apresentado nesta dissertação.

3.3.1 Materiais

Para a análise das pastas cimentícias e a moldagem dos 145 corpos de prova necessários à execução do procedimento experimental, os materiais utilizados para o preparo dos concretos foram: areia de jazida e brita de origem granítica, ambas procedentes do município de Linhares (ES) e cedidas pela Concrevit do Espírito Santo, cimento Portland CPV ARI RS, cedido pela Mizu Cimentos, água fornecida pela concessionária local (CESAN), e o resíduo de ETE, cedido pela Viminias do Espírito Santo.

3.3.1.1 Agregado miúdo

A areia utilizada como agregado miúdo é proveniente de uma jazida do município de Linhares/ES. Os ensaios realizados para avaliar o cumprimento das determinações normativas para utilização nos concretos, bem como sua caracterização física, foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo – LEMAC/UFES. Os resultados da distribuição granulométrica atenderam aos limites da zona utilizável, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009), como pode ser observado na tabela 3.3. A caracterização física foi realizada de acordo com a norma correspondente a cada propriedade, conforme citado nas notas contidas na tabela 3.4.

Tabela 3.3 - Distribuição granulométrica da areia

Peneira (mm)**	Massa retida (%)**	Massa acumulada (%)**
4.75	0	0
2.36	0	0
1.18	5	5
0.60	26	31
0.30	23	54
0.15	24	78
FUNDO	22	100

Módulo de finura:1,7

Nota: Normas adotadas

*NBR 7211 (ABNT, 2009) - Agregados para concreto –Especificação

** NBR NM 248 (ABNT, 2003) – Agregados – determinação da composição granulométrica

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 3.4 - Caracterização da areia

Massa específica (kg/m ³)**	Massa unitária (kg/dm ³)***	Absorção de água (%)	Material pulverulento (%)****
2,646	1,627	N.A.*	4,96

Nota: Normas adotadas

* Não avaliado

** NBR NM 52 (ABNT, 2009) - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.

*** NBR NM 45 (ABNT, 2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios

**** NBR NM 46 (ABNT, 2003) - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem

Fonte: Acervo Pessoal

3.3.1.2 Agregado graúdo

A brita de origem granítica foi o agregado graúdo selecionado para o experimento. Visando a aplicação para bom desempenho do concreto, foi classificada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). Apesar de ter sido cedida pela Concrevit do Espírito Santo, a brita é proveniente da Brasília, localizada no município da Serra / ES.

A distribuição granulométrica e a caracterização física da brita utilizada podem ser observadas, respectivamente, nas tabelas 3.5 e 3.6, bem como a normatização regulamentadora de cada ensaio.

Tabela 3.5 - Distribuição granulométrica da brita

Peneira (mm)	Massa retida (%)	Massa acumulada (%)	Massa retida acumulada (%)**
			Zona granulométrica 4,75/12,5**
19	0	0	--
12.5	0	0	0 a 5
9.5	17	17	2 a 15
6.3	54	71	40 a 65
4.8	20	91	80 a 100
FUNDO	9	100	

Módulo de finura**: 5,63

DMC – Dimensão máxima característica**:12,5

Nota: Normas adotadas

*NBR 7211 (ABNT, 2009) - Agregados para concreto - Especificação

** NBR NM 248 (ABNT, 2003) – Agregados – determinação da composição granulométrica

Fonte: Acervo Pessoal

A distribuição granulométrica da brita utilizada atendeu às normas brasileiras de regulamentação e apresentou limites próximos da zona granulométrica 4,75/12,5.

Tabela 3.6 - Caracterização da brita

Massa específica (kg/m ³)*	Massa unitária (kg/dm ³)**	Absorção de água (%)*	Material pulverulento (%)***
2,77	1,49	0,7	1,4

Nota: Normas adotadas

* NBR NM 53 (ABNT, 2009) - Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água

** NBR NM 45 (ABNT, 2006) - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios

*** NBR NM 46 (ABNT, 2003) - Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem

Fonte: Acervo Pessoal

3.3.1.3 Cimento Portland CPV ARI RS

A caracterização do cimento Portland CPV ARI RS foi fornecida pelo fabricante e consta da tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Caracterização do cimento Portland CPV ARI RS

Propriedades Determinadas CP V ARI RS	Teores	Método de Ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Análises físicas			
Massa específica (g/cm ³)	3,05	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	440	NBR NM 76 (ABNT, 1998)
	Finura - resíduo na peneira 325#	1,7	NBR 12826 (ABNT, 1993)
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	135	NBR NM 65 (ABNT, 2002)
	Fim de Pega (min)	165	NBR NM 65 (ABNT, 2002)
Água de Consistência - Pasta (%)	30,4	NBR NM 43 (ABNT, 2002)	N.E.
Análises químicas			
	Perda ao fogo - PF (%)	4,45	NBR NM 18 (ABNT, 2004)
	CaO (%) -Livre	1,62	NBR NM 14 (ABNT, 2004)
	SO ₃ (%)	3,00	NBR NM 16 (ABNT, 2004)
	Resíduo Insolúvel - RI (%)	1,00	NBR NM 15 (ABNT, 2004)
Resistência à compressão			
	1dia (MPa)	17,8	NBR 7215 (ABNT, 1997)
	3 dias (MPa)	30,6	NBR 7215 (ABNT, 1997)
	7 dias (MPa)	38,8	NBR 7215 (ABNT, 1997)
Nota: N.E. – Não especificado			

Fonte: Dados cedidos pela Mizu Concreto Vitória (2011).

De acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991), o cimento Portland CPV ARI RS é um aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Foi adotado neste estudo por não conter adições. Isso por que seria possível avaliar mais claramente os efeitos das substituições do cimento pelo resíduo de ETE em diferenciados teores.

3.3.1.4 Resíduo de ETE provenientes do beneficiamento do vidro plano

O resíduo utilizado para os ensaios nas misturas de concreto foi coletado na ETE instalada na Viminás, indústria beneficiadora de vidros localizada no CIVIT II, município da Serra, região metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo, Brasil. Para a aplicação neste estudo, o resíduo em lama foi seco e destorroado.

Em um primeiro momento, com objetivo de minimizar o tempo e conseqüentemente o custo do preparo do resíduo para a aplicação eficaz, a secagem foi feita em área coberta, mas ventilada. Após o primeiro processo de destorroamento, foi possível notar que mesmo estando na forma de um pó muito fino, o resíduo ainda possuía umidade suficiente para causar equívocos na aplicação do material. Optou-se, portanto, por secar todo o material em estufa, a 105° C e novamente proceder ao destorroamento. Apenas após este processo o resíduo foi armazenado em tonéis vedados para que a umidade do ar não fosse absorvida e permitisse a criação de grumos, como ocorrido ao final do primeiro processo de secagem e destorroamento. Após secagem em estufa por 24 horas a 105°C e destorroamento, o resíduo foi submetido a um ensaio de granulometria a laser (granulômetro *Sympatech*), possibilitando a constatação de que 90% das partículas estão abaixo de 38,37 µm,

Foi realizada a determinação da massa específica de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), obtendo-se o valor de 2,488 g/cm³. Também a determinação da massa unitária no estado solto foi realizada, de acordo com a NBR 12127 (ABNT, 1991), obtendo-se o valor de 0,627 kg/dm³. A superfície específica foi determinada pelo método de Blaine, normatizado pela NBR NM 76 (1998) e apresentou 3685,70 cm²/g, um pouco mais grosso que o cimento utilizado, que possui superfície específica de 4400 cm²/g.

Não se julgou necessária a submissão do resíduo a ser utilizado nesta pesquisa a procedimentos de moagem, por já ser resultante de um processo de polimento que gera partículas muito finas (figura 3.2). A distribuição granulométrica do resíduo de ETE é constante da tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Distribuição granulométrica do resíduo.

Material passante (%)	Granulometria (μm)
10	2,08
50	9,90
90	38,37
Superfície específica - Blaine	3685,70 cm^2/g

Nota: Dado obtidos a partir de relatório gerado no ensaio de granulometria a laser, realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LEMAC/UFES.

Fonte: Acervo Pessoal.

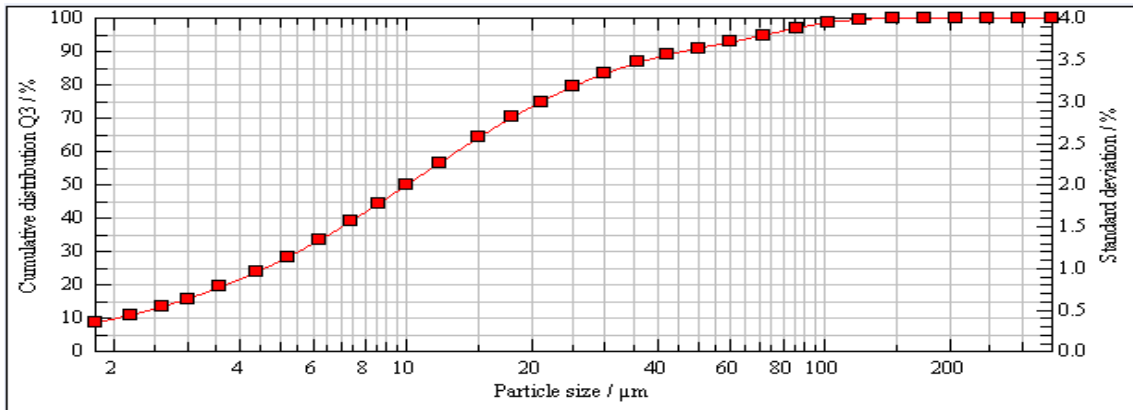
Figura 3.2 - Aparência do resíduo aplicado às misturas de concreto



Fonte: Acervo Pessoal.

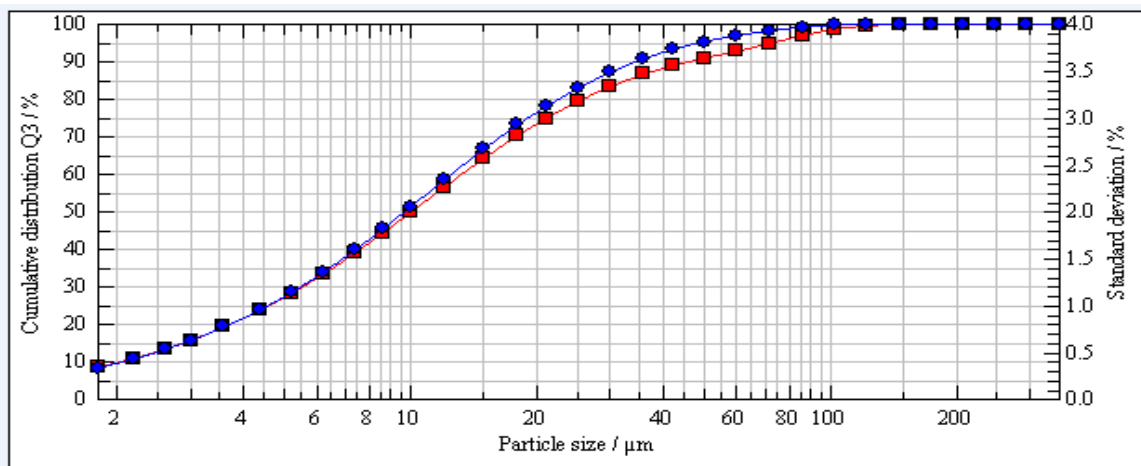
A granulometria a laser revelou que as partículas do resíduo apresentam uniformidade dimensional. O ensaio foi realizado por três vezes, com três porções diferenciadas da amostra, apenas para que se confirmasse a uniformidade da amostra coletada. Foram geradas curvas granulométricas que foram sobrepostas na ordem de repetição dos ensaios, para efeito de comparação. As figuras 3.3, 3.4 e 3.5 foram geradas pelo granulômetro a laser e ilustram as etapas deste processo.

Figura 3.3 – Curva granulométrica da primeira amostra submetida ao ensaio



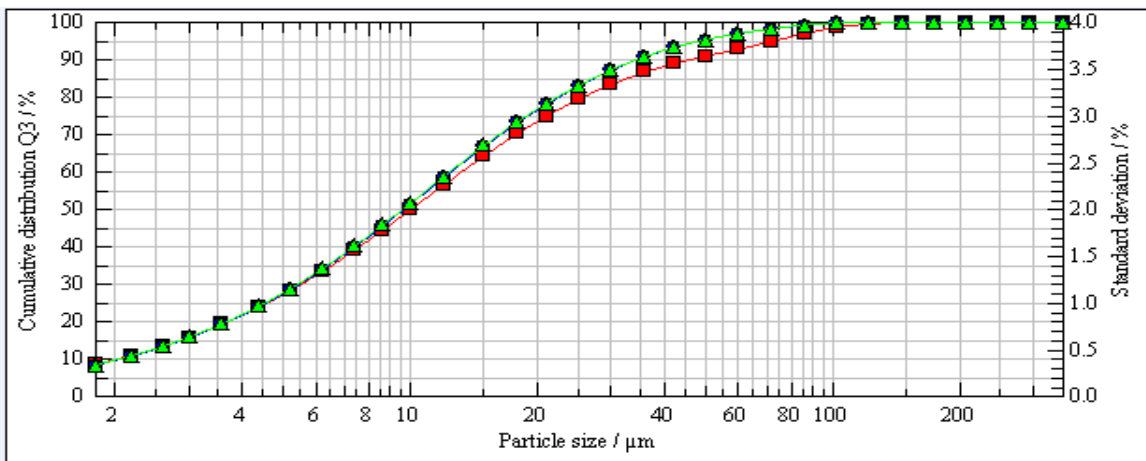
Fonte: Acervo Pessoal

Figura 3.4 - A curva granulométrica da segunda amostra (azul) comparada à da primeira amostra (vermelha)



Fonte: Acervo Pessoal.

Figura 3.5 – Sobreposição das curvas granulométricas resultantes dos três ensaios



Fonte: Acervo Pessoal.

O ensaio de determinação da composição química do resíduo foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, em Natal, no estado brasileiro do Rio Grande do Norte, em julho de 2011. Foi utilizado o método de análise semiquantitativa por fluorescência de raios X (FRX) com perda ao fogo (PF) do resíduo. A amostra foi prensada em prensa manual em forma de pastilhas, de diâmetro aproximado de 15 mm. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) são analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material foi seco em estufa por 24 horas em temperatura de 110°C e depois foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

A tabela 3.9 apresenta os resultados da análise química em porcentagem de massa em óxidos com valor de perda ao fogo da amostra em estudo.

Tabela 3.9 - Caracterização do resíduo de ETE estudado.

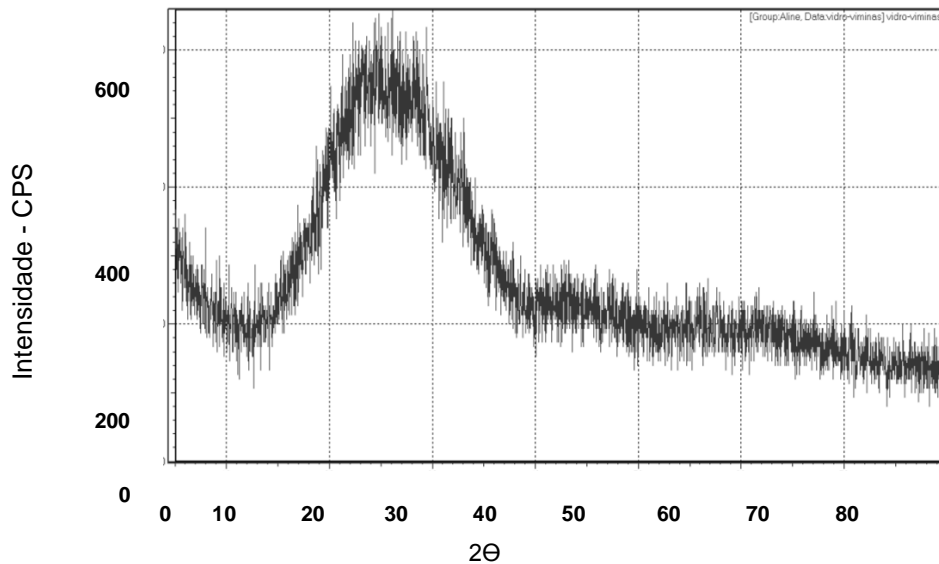
Óxidos	%
SiO ₂	64,29
CaO	13,64
Na ₂ O	11,49
Al ₂ O ₃	4,25
MgO	4,16
K ₂ O	0,53
Fe ₂ O ₃	0,38
SO ₃	0,38
CuO	0,05
SrO	0,02
ZrO ₂	0,01
P.F.	0,80

Fonte: Acervo Pessoal.

Observa-se pouca diferença nas composições químicas do vidro e do resíduo estudado. A composição química do resíduo apresenta, no entanto, maior quantidade de óxido de potássio (K₂O), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de sódio (Na₂O) e, principalmente, óxido de cálcio (CaO) do que a composição do vidro. O resíduo encontra-se em estado amorfo, conforme pode ser observado na figura 3.6, que apresenta o difratograma de raios X (DRX), realizado no Laboratório de

Materiais Carbonosos e Cerâmicos do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo.

Figura 3.6 - Difratoograma de raios X do resíduo estudado



Fonte: Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos – Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

3.3.2 Métodos

O subproduto proveniente da ETE foi coletado no dia 17 de setembro de 2010, imediatamente após a passagem do resíduo pelo filtro prensa, na estação de tratamento de efluentes da Viminás, identificado e acomodado no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC – UFES).

Através da revisão bibliográfica realizada para a aplicação do vidro moído aplicado ao concreto em procedimentos coerentes ao desta dissertação, foram estabelecidas as dosagens a serem adotadas, bem como os teores de substituição e os ensaios selecionados para a determinação das propriedades das pastas e dos concretos produzidos.

Estudos realizados com aplicação de vidros cominuídos a concretos demonstram a utilização dos traços experimentais adotados neste estudo. Arruda *et al.* (2001), López *et al.* (2003), López *et al.* (2005) e Schwarz e Neithalath (2008), por exemplo,

utilizam o corpo de prova piloto, ou referência, sem adições de vidro moído e corpos de prova com 5, 10, 15 e 20% de vidro moído em substituição em massa ao cimento. Serão estas as proporções utilizadas também neste estudo.

Determinadas as dosagens, foram produzidas as pastas cimentícias de traço referência e traços com teores de resíduo substitutivos ao cimento em massa. As pastas foram submetidas a ensaios de expansibilidade e tempo de pega de acordo com as normas vigentes relacionadas aos ensaios em questão.

Posteriormente, utilizando-se das mesmas dosagens, os concretos foram produzidos e os corpos de prova referência e de traços experimentais foram moldados e armazenados. Foram realizados ensaios nos concretos em estado fresco e em estado endurecido.

Para os traços com as substituições em massa de cimento pelo resíduo foram adotadas as nomenclaturas listadas na tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Nomenclatura dos traços moldados de acordo com as substituições em massa do cimento pelo resíduo.

Traço Moldado	Nomenclatura
Traço referência (sem substituição de cimento)	REF
Traço com 5% de substituição em massa	S5
Traço com 10% de substituição em massa	S10
Traço com 15% de substituição em massa	S15
Traço com 20% de substituição em massa	S20

Fonte: Acervo Pessoal.

3.3.2.1 Preparo das dosagens das pastas cimentícias

A consistência das pastas para os ensaios foi obtida pela norma de determinação da pasta de consistência normal para cimento Portland descrito na NBR NM 43 (ABNT, 2003). Bem como nas misturas de concreto para moldagem de corpos de prova, a quantidade de água utilizada para cada traço manteve-se constante, conforme se observa na tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Traços empregados para as pastas cimentícias utilizadas neste experimento

Traço	Cimento (g)	Resíduo (g)	água (ml)
Traço REF	500	-	160
Traço S5	475	25	160
Traço S10	450	50	160
Traço S15	425	75	160
Traço S20	400	100	160

Fonte: Acervo Pessoal.

a. Determinação da expansibilidade pelo método de Le Chatelier

Após a determinação dos traços das pastas cimentícias, foi realizado o ensaio de determinação de expansibilidade pelo método de Le Chatelier, conforme a NBR 11582 (ABNT, 1991), com o método de ensaio de cura a quente.

Após a cura inicial de aproximadamente 24 horas das agulhas preenchidas com as pastas cimentícias imersas em tanque de água potável com temperatura controlada de 23°C, estas foram mergulhadas em recipiente apropriado para a realização da cura a quente, onde se aguardou pela estabilização da expansibilidade de cada uma das agulhas.

3.3.2.2 Preparo das dosagens dos concretos

Foram preparadas dosagens de diferentes teores de substituição do cimento pelo resíduo em massa, conforme descrito na tabela 3.12 e foram determinadas com base na revisão bibliográfica realizada. Os valores adotados provêm de pesquisas realizadas com resíduos de vidro moído (Arruda *et al.*, 2001). O valor de resistência de 35 MPa foi adotado para este estudo.

A betoneira utilizada é de eixo inclinado (*Mecânica Alfa S/A*), com capacidade de 350 litros (figura 3.7).

Figura 3.7 - Betoneira de eixo inclinado com capacidade de 350 litros utilizada para homogeneizar as misturas de cada traço dos concretos



Fonte: Acervo Pessoal.

O volume da mistura se manteve constante, o que permitiu que muitas observações fossem feitas em relação à aparência, à absorção de água e à trabalhabilidade dos concretos na medida em que a quantidade de resíduo aumentava, sem que o volume fosse incrementado, já no momento subsequente ao término da mistura na betoneira.

Tabela 3.12 - Relação dos traços e da composição em massa das misturas de concreto

Traços	Teor de substituição (%)	cimento	areia	brita	resíduo	relação a/ag
Traço REF	0	1	2,054	2,786	0	0,51
Traço S5	5	0,95	2,054	2,786	0,05	0,51
Traço S10	10	0,90	2,054	2,786	0,10	0,51
Traço S15	15	0,85	2,054	2,786	0,15	0,51
Traço S20	20	0,80	2,054	2,786	0,20	0,51

Fonte: Acervo Pessoal.

Na figura 3.8, pode-se observar o aspecto “liso” do concreto referência, demonstrando a boa trabalhabilidade da massa após homogeneização em betoneira.

Uma sequencia para a inserção dos compósitos do concreto foi adotada, para que se evitasse a perda de material e o amassamento fosse mais homogêneo. Após a imprimação da betoneira, era acrescida primeiramente a brita e subsequentemente, parte da água. Após este momento, o cimento era acrescido á mistura, seguindo-se do acréscimo de parte da areia, todo o conteúdo previsto de resíduo e o restante da areia. O restante da água foi sendo adicionada em intervalos, para que a homogeneização ocorresse de forma mais rápida e eficaz, principalmente quando as quantidades de resíduo eram maiores, devido á grande absorção de água promovida pelo mesmo. Percebeu-se que quanto maior a quantidade de resíduo, maior a absorção de água ainda em fase de amassamento.

Figura 3.8 - O aspecto liso da massa de concreto de traço referência após homogeneização em betoneira demonstra boa trabalhabilidade



Fonte: Acervo Pessoal.

Tal providência também foi adotada devido à grande quantidade de material pulverulento em suspensão no ar ao redor da betoneira enquanto a mistura não estava completamente umedecida.

3.3.2.3 Preparo dos corpos de prova

Saídas as massas de concreto da betoneira após o amassamento, a moldagem dos corpos de prova iniciava-se imediatamente, devido ao reduzido tempo de pega do

cimento Portland CPV ARI RS, para que as condições de moldagem fossem semelhantes para todas as peças (figuras 3.9 e 3.10).

Figura 3.9 – Início da preparação dos corpos de prova



Fonte: Acervo Pessoal.

Figura 3.10 – Corpos de prova finalizados



Fonte: Acervo Pessoal.

Todos os corpos de prova utilizados neste experimento foram moldados em fôrmas cilíndricas de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, conforme determinação da NBR 5738 (ABNT, 2003) para corpos de prova submetidos a ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão. Os corpos de prova eram preparados, rasados em seu topo com equipamento apropriado e mantidos em repouso para secagem por 24

horas. Após o rasamento, a extremidade exposta do molde era coberta para que, durante a maturação, não ocorresse perda excessiva de água para o ambiente.

Os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório e desmoldados em um período de 24 horas. Seguidamente, foram identificados e armazenados em câmara úmida (figura 3.11) até a data pré-determinada para a realização de cada um dos ensaios de resistência mecânica nas idades apropriadas. A câmara úmida era regularmente umedecida, para manutenção e controle da umidade do ar no interior do ambiente.

Os corpos de prova submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial e módulo estático de elasticidade foram capeados com enxofre poucos minutos antes da execução do procedimento, para evitar irregularidades nas superfícies, certificando-se da uniformidade distribuição das cargas aplicadas sobre eles.

Figura 3.11 - Corpos de prova armazenados em câmara úmida para processo de cura uniforme



Fonte: Acervo Pessoal.

3.3.2.4 Ensaios de concreto em estado fresco

A amostragem do concreto fresco para os ensaios foi realizada de acordo com a NBR NM 33 (ABNT, 1998).

Imediatamente após o término da mistura na betoneira foram coletadas amostras para os ensaios de consistência por abatimento de tronco de cone, exsudação de água, teor de ar incorporado e massa específica.

a. Determinação de consistência por abatimento de tronco de cone

Para os ensaios de determinação de consistência, (figura 3.12) foi adotado o método do tronco de cone, regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). A consistência havia sido determinada através de um teste piloto com as mesmas proporções do traço referência, anteriormente aos ensaios que comporiam definitivamente este estudo. A consistência adotada como ideal para este estudo seguiu o parâmetro de 60 ± 10 mm (figura 3.13). À finalização do ensaio, o concreto referência mostrou-se coeso e com boa trabalhabilidade, sem exsudação de água.

Figura 3.12 - Retirada do tronco de cone para ensaio de consistência



Fonte: Acervo Pessoal.

Figura 3.13 – Aparência do concreto referência no momento da aferição da consistência



Fonte: Acervo Pessoal.

b. Determinação de massa específica pelo método pressométrico

Os ensaios para determinação da massa específica foram realizados de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009).

Para cada traço experimentado, o procedimento foi realizado duas vezes, por exigência da norma regulamentadora do ensaio. Preenchido o recipiente de volume de 3 litros (figura 3.14), este obteve sua massa mensurada e o resultado obtido foi próximo ao esperado e pouco variável em todos os traços.

Figura 3.14 - Recipiente utilizado para o ensaio de massa específica após rasamento, pronto para ser pesado em balança com tara preparada



Fonte: Acervo Pessoal.

Apenas a título de conferência, o ensaio de massa específica foi repetido também no momento em que o ensaio de teor de ar incorporado (método pressométrico) ao concreto fresco foi realizado, mas não houve divergência de resultados.

c. Determinação da quantidade de água de exsudação

O ensaio de exsudação de água foi realizado de acordo com a NBR 15558 (ABNT, 2008). Conforme solicita a norma, foi utilizado um recipiente cilíndrico, de 250 mm de diâmetro e 280 mm de altura. A água de exsudação foi retirada a cada dez minutos durante os primeiros 40 minutos, e daí em diante em intervalos de 30 minutos.

d. Determinação do teor de ar incorporado

Os ensaios de determinação de teor de ar incorporado foram realizados de acordo com a NBR NM 47 (ABNT, 2002). O equipamento utilizado foi aferido minutos antes do ensaio, realizado imediatamente após o término do amassamento da mistura do concreto em betoneira (figura 3.15).

Figura 3.15 - Equipamento utilizado para realizar o ensaio de teor de ar incorporado



Fonte: Acervo Pessoal.

3.3.2.5 Ensaios em concreto em estado endurecido

Para a realização de todos os ensaios, os corpos de prova eram mantidos em repouso na câmara úmida, atendendo aos corretos procedimentos de cura para realização dos ensaios mecânicos.

a. Resistência à compressão axial

Os ensaios em concreto endurecido foram realizados em prensa *Amsler* de mostrador analógico, pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Foi testada a resistência à compressão axial dos corpos de prova de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro, nas idades de 3, 7 e 28 dias de cada traço conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007). Para cada idade foram testados 4 corpos de prova capeados com enxofre pouco antes da realização dos ensaios.

b. Resistência a tração por compressão diametral

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral também foram realizados no LEMAC – UFES, em prensa *Amsler* de mostrador analógico. Foi testada a resistência à tração por compressão diametral de 4 corpos de prova de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro nas idades de 3, 7 e 28 dias de cada traço conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007). Certificou-se a regularidade da superfície dos corpos de prova pelo capeamento com enxofre no momento da realização dos ensaios.

c. Módulo estático de elasticidade

O ensaio de módulo estático de elasticidade foi realizado em prensa *Emic Equipamentos e Sistemas de Ensaio Ltda.* com capacidade para 3000 kN, no Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes). Foram testados 5 corpos de prova de idade superior a 28 dias.

3.3.2.6 Análise microestrutural

A análise da microestrutura e das propriedades individuais dos constituintes do concreto, quando da relação entre eles serve para auxiliar no controle das suas propriedades (METHA; MONTEIRO, 2008).

No intuito de verificar se a substituição do cimento pelo resíduo estudado provocou mudanças representativas nas pastas cimentícias e nas matrizes cimentícias do concreto, em especial na zona de transição em relação à amostra referência, as amostras das pastas cimentícias endurecidas e dos concretos produzidos foram investigadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca *Zeiss*, modelo EVO 40 XVP equipado com sistema de micro análise por espectrômetro de energia dispersiva (EDS) da marca *IXRF*. Todo o processo de preparo das amostras para análise microestrutural transcorreu no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo (figura 3.16).

Figura 3.16 – MEV equipado com EDS utilizado para ampliação e análise microestrutural das amostras das pastas cimentícias e dos concretos produzidos em fase endurecida



Fonte: Acervo Pessoal.

As análises realizadas visaram avaliar a microestrutura das amostras das pastas cimentícias com diferentes teores de substituição do cimento pelo resíduo de ETE extraídas dos cilindros remanescentes dos ensaios para determinação de expansibilidade a quente e dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial entre três unidades ensaiadas após a idade de 28 dias. Coletadas aleatoriamente no cerne dos corpos de prova, as amostras permaneceram em estufa durante 24 horas, identificadas e resfriadas em dessecador a vácuo.

Devido à baixa condutividade do material analisado, foi necessário o aterramento dos fragmentos com fita metálica entre a superfície das amostras e o porta amostras, seguido pelo processo de metalização. Nesse processo as superfícies foram recobertas uniformemente com uma película de platina para que pudessem ser observadas ao MEV (figura 3.17).

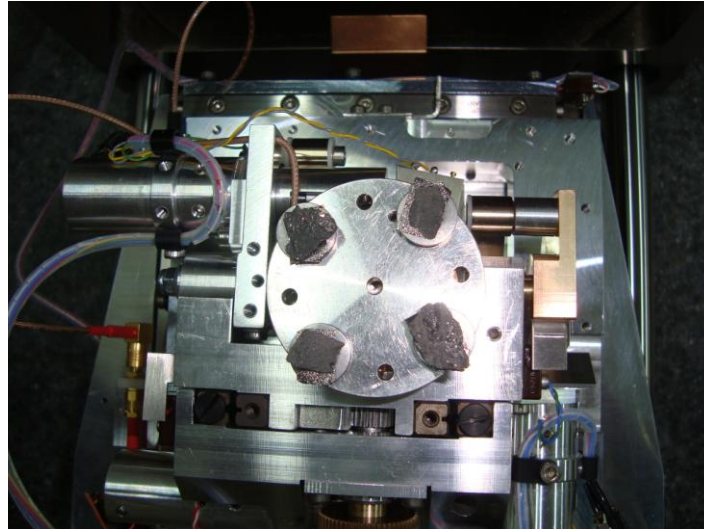
Figura 3.17 – Metalizador de amostras utilizado (marca *Emitech*, modelo *K550 Sputter Coater*)



Fonte: Acervo Pessoal.

Após a metalização das superfícies, o porta amostras foi inserido no MEV (figura 3.18). As imagens foram obtidas utilizando o detector de elétrons secundários (SE) e a microanálise de algumas amostras em regiões específicas foram obtidas utilizando-se o espectrômetro por energia dispersiva de raios-X (EDS).

Figura 3.18 – Amostras metalizadas com platina já locadas no porta amostras para inserção no MEV.



Fonte: Acervo Pessoal.

3.3.3 Métodos estatísticos utilizados

Foram utilizados os modelos estatísticos para a comparação de vários grupos e o projeto fatorial com dois fatores.

Todos os resultados dos ensaios em concretos endurecidos foram submetidos a testes estatísticos de análise de variância (ANOVA) para verificação do grau de significância do efeito dos fatores controláveis nas propriedades estudadas (variáveis de resposta).

Para a variável de resposta módulo de elasticidade à compressão, foi utilizada a análise de variância com comparação de vários grupos (*One-way Analysis of Variance*), experimento aleatório que envolve uma variável de resposta e um fator controlável a vários níveis, com o objetivo principal de identificar se os resultados obtidos nos ensaios com os concretos referência e com concretos com diferentes teores de substituição diferem entre si, pois todas as variáveis de resposta analisadas neste experimento são quantitativas e mensuráveis.

Para as variáveis de resposta relativas à resistência à compressão axial e à resistência à tração por compressão diametral, a análise de variância foi feita por um projeto fatorial envolvendo dois fatores, em que todas as combinações de níveis de fatores foram investigadas (*Two-way Analysis of Variance*). Os fatores controláveis e

os fatores constantes foram avaliados não apenas quanto à influência que exerceram individualmente sobre as variáveis de resposta, mas também quanto à influência de suas interações para a obtenção dos resultados. Afinal, ainda que um fator analisado isoladamente não exerça influência significativa, sua interação com outro fator pode ser determinante para a definição qualitativa do experimento analisado.

Além disso, foram realizados testes de agrupamento de médias (Tukey) para verificação da formação de grupos de resultados homogêneos. As análises foram realizadas com o auxílio do *software* Statística 7.0 (STATSOFT, 2004). A seguir apresenta-se breve explicação dos testes utilizados.

3.3.3.1 Análise de variância (ANOVA)

A ANOVA basicamente divide a variabilidade em variabilidade *Entre Grupos* e variabilidade *Dentro de Grupos*, e compara as duas. Quanto maior for a primeira comparada à segunda, maior é a evidência de que existe variabilidade entre grupos, ou seja, médias diferentes.

Define-se a soma de quadrados total, SQT, como:

$$SQT = \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Equação 1})$$

Essa expressão é calculada a partir de todos os dados, em que \bar{x} é a média amostral global.

A estimativa usual de variância de uma amostra é:

$$s^2 = SQT / (n - 1) \quad (\text{Equação 2})$$

Pode-se dividi-la como:

$$SQT = SQD + SQE \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo SQD utilizado para denotar a soma de quadrados dentro de grupo e SQE para a soma de quadrados entre grupos, definidos por:

$$SQD = \sum_{gp1} (x_i - \bar{x}_1)^2 + \sum_{gp2} (x_i - \bar{x}_2)^2 + \sum_{gp3} (x_i - \bar{x}_3)^2 + \sum_{gp4} (x_i - \bar{x}_4)^2 \quad (\text{Equação 4})$$

onde \bar{x}_k é a média amostral do grupo k ; e

$$SQE = n_1(\bar{x}_1 - \bar{x})^2 + n_2(\bar{x}_2 - \bar{x})^2 + n_3(\bar{x}_3 - \bar{x})^2 + n_4(\bar{x}_4 - \bar{x})^2 \quad (\text{Equação 5})$$

em que n_k é o tamanho amostral do grupo k .

Separada a variabilidade, é possível mostrar que se podem obter estimativas independentes da variância populacional comum σ^2 a partir destas duas quantidades. Elas são chamadas de valores quadrados médios, e obtêm-se as seguintes estimativas:

$$s_1^2 = SQE / (m - 1) \quad (\text{Equação 6})$$

$$s_2^2 = SQD / (N - m) \quad (\text{Equação 7})$$

em que m é o número de grupos, e N é o tamanho amostral total. Como estas estimativas de variância são construídas a partir de dois tipos diferentes de variabilidade, quanto mais elas diferirem, mais evidência existe de diferença nas médias. A estatística de teste é a seguinte:

$$F_{calc} = s_1^2 / s_2^2 \quad (\text{Equação 8})$$

Compara-se este valor com uma distribuição F (parâmetro de Fischer) com $m-1$ e $N-m$ graus de liberdade para obter um p -valor. As médias obtidas serão estatisticamente diferentes se $p\text{-valor} < 0,05$, dado que se adotou um intervalo de

confiança de 95%. Quanto maior for o valor do F calculado (F_{calc}) em relação ao F crítico (F_{tab}), maior será essa diferença.

$$F_{crit} = F_{\alpha;GL_E;GL_D} \quad (\text{Equação 9})$$

onde α é o nível de significância, $GL_E = m-1$ é o grau de liberdade entre os grupos e $GL_D = N-m$ é o grau de liberdade dentro dos grupos, ou grau de liberdade residual (GL_{res}).

a. Teste de Tukey

O teste de Tukey é um teste estatístico de comparação múltipla entre as médias para determinar quais grupos diferem entre si. O primeiro passo é ordenar as médias de forma decrescente, anotando o grupo e o tamanho amostral correspondente.

Em seguida, calculam-se as diferenças entre as médias dos grupos experimentais e estima-se o Erro Padrão (EP) de cada diferença entre as médias usando a fórmula:

$$EP = \sqrt{\frac{QM_{res}}{2} \times \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (\text{Equação 10})$$

onde n_k é o tamanho amostral do grupo k e QM_{res} é o quadrado médio residual (ou SQD, conforme a equação 4).

Para cada diferença de médias, calcula-se a estatística de teste q_{calc} e compara-se com o valor crítico q_{crit} :

$$q_{calc} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{EP} \quad (\text{Equação 11})$$

onde \bar{x}_k é a média do grupo k e EP é o erro padrão entre os respectivos grupos.

$$q_{crit} = q_{\alpha;m;GL_{res}} \quad (\text{Equação 12})$$

onde α é o nível de significância, m é o número total de grupos e GL_{res} é o grau de liberdade residual (ou grau de liberdade dentro dos grupos, GL_D). Se o valor de q_{calc} para cada par de grupos for maior do que q_{crit} , então os grupos diferem entre si.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

No capítulo anterior, foram demonstrados os métodos de caracterização e as características dos materiais utilizados no programa experimental. Foram estabelecidas as dosagens das pastas cimentícias e dos concretos, para estabelecer em massa a correspondência aos percentuais de 5, 10, 15 e 20% de substituição do cimento Portland CPV ARI RS pelo resíduo de ETE para o preparo das pastas e dos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios propostos.

A metodologia aplicada à análise microestrutural das pastas cimentícias e concretos, bem como os testes utilizados para o tratamento estatístico dos resultados também foram definidos e descritos no capítulo 3.

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Os resultados estão ordenados e agrupados de forma a facilitar sua leitura e compreensão. Inicialmente são abordados os resultados relativos às pastas

cimentícias, compreendendo a determinação da expansibilidade por cura a quente, pelo método de Le Chatelier.

Em seguida, apresenta-se a avaliação dos resultados dos concretos, tanto em estado fresco quanto endurecido, abrangendo os ensaios de determinação de consistência por abatimento de tronco de cone, massa específica (método pressométrico), exsudação de água, teor de ar incorporado, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade. Os resultados relativos aos concretos em estado endurecido foram submetidos a uma análise estatística. Por fim, apresentam-se os resultados obtidos pela caracterização da microestrutura.

4.1 Ensaios realizados nas pastas cimentícias

4.1.1 Determinação de expansibilidade pelo método de Le Chatelier

O ensaio para determinação de expansibilidade pelo método de Le Chatelier foi realizado conforme a NBR 11582 (ABNT, 1991), com o método de ensaio de cura a quente, conforme descrito no capítulo anterior. Os resultados estão dispostos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados dos ensaios de expansibilidade pelo método de Le Chatelier em cura a quente.

Traço	Expansibilidade média final (mm)	Tempo de cura a quente (h)
Traço REF	0,4	9
Traço S5	0,14	9
Traço S10	0	7
Traço S15	0	7
Traço S20	0	9

Fonte: Acervo Pessoal

Apenas os concretos REF e S5 expandiram e atenderam ao limite de 5 mm determinado pela NBR NM 12989 (ABNT, 1993). No caso das pastas dos traços S10, S15 e S20, não houve expansibilidade. Pelo contrário, foi notada a retração das pastas ao final dos ensaios.

4.2 Ensaio realizados nos concretos em estado fresco

4.2.1 Determinação de consistência pelo abatimento de tronco de cone

Os resultados dos ensaios para determinação de consistência pelo abatimento de tronco de cone, realizados conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), estão expostos na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultados das consistências determinadas pelo método de abatimento de tronco de cone para os concretos frescos

Traço	Abatimento de tronco de cone – parâmetro determinado (mm)	Abatimento de tronco de cone obtido (mm)
REF	60 ± 10	65
S5	60 ± 10	60
S10	60 ± 10	50
S15	60 ± 10	40
S20	60 ± 10	20

Fonte: Acervo Pessoal.

Apesar dos resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone dos traços S15 e S20 estarem distantes do parâmetro determinado, os concretos apresentaram aspecto coeso e plasticidade, mostrando-se trabalháveis no momento da moldagem dos corpos de prova.

Park *et al.* (2004), Topçu e Canbaz (2004) e Ismail e Al-Hashmi (2009) fizeram observações semelhantes relativas à consistência de concretos em que o pó de vidro foi utilizado. Afirmam que ocorreu redução da consistência na medida em que aumentava a quantidade de pó de vidro nas misturas. A queda no valor do abatimento pode ser devida à geometria desfavorável do resíduo de vidro, que resulta em menor fluidez das misturas, assim como a redução do módulo de finura. Apesar do aumento da consistência, os concretos com resíduo de vidro foram considerados trabalháveis pelos autores.

A baixa granulometria do resíduo utilizado também pode ser um motivo para a redução dos valores de abatimento, pois um material de maior superfície específica tende a demandar maior consumo de água.

4.2.2 Determinação de massa específica pelo método pressométrico

Apesar da variação dos teores de substituição nas misturas de concreto, os resultados dos ensaios para determinação de massa específica, realizados pelo método pressométrico, são constantes da tabela 4.4 e não apresentam variação significativa entre os traços.

Tabela 4.4 - Resultados dos ensaios de massa específica pelo método pressométrico

Traço	Massa específica obtida (kg/dm ³)
REF	2,408
S5	2,391
S10	2,391
S15	2,400
S20	2,383

Fonte: Acervo Pessoal.

4.2.3 Determinação da exsudação de água

O ensaio de exsudação de água foi realizado de acordo com a NBR 15558 (ABNT, 2008). A redução da quantidade de água exsudada do concreto fresco foi perceptível e significativa, chegando a reduzir em torno de 50% quando comparados os concretos de traço REF e S20, conforme é possível observar na tabela 4.5.

Segundo Silva (2005), os principais fatores que influenciam na exsudação são a relação água/cimento e o teor de elementos finos: a exsudação ocorre em concretos com alta relação água/cimento e com poucas partículas finas que retenham a água.

Tabela 4.5 - Resultados dos ensaios de exsudação de água

Traço	Quantidade de água exsudada nos 40 minutos iniciais (ml)	Quantidade de água exsudada tempo subsequente (ml)	Tempo de exsudação além dos 40 minutos iniciais (min)	Total de água exsudada (ml)
REF	9,5	13	90	22,5
S5	7,1	18,3	90	25,4
S10	14,2	4,4	30	18,6
S15	8,6	6,2	30	14,8
S20	6,5	4,7	30	11,2

Fonte: Acervo Pessoal.

O uso de adições minerais é uma medida comumente empregada para combater a tendência à exsudação, justamente por proporcionar o aumento do volume de finos à massa de concreto.

Portanto, a redução da exsudação de água nas misturas de concreto com maiores teores de resíduo pode ser explicada não apenas pela grande capacidade de absorção de água do material, mas também por sua finura, capaz de reduzir os espaços intragranulares proporcionando o aumento da resistência ao percurso ascendente da água. Dal Molin (2011) afirma que mesmo quando o diâmetro médio das adições é semelhante ao do cimento, sua menor massa específica, como é o caso do resíduo utilizado neste estudo, faz com que o volume da pasta de cimento somado ao da adição normalmente exceda o volume da pasta de cimento dos concretos sem adição. O aumento da relação do volume de sólidos para o volume de água produz uma pasta com maior plasticidade e maior coesão, oferecendo maiores possibilidades de se obter concretos mais resistentes.

4.2.4 Determinação do teor de ar incorporado

Os ensaios de teor de ar incorporado realizados conforme a NBR NM 47 (ABNT, 2002) apresentam os seguintes resultados (tabela 4.6).

O teor de ar incorporado pode ser considerado normal em todos os traços estudados, verificando-se inclusive que, aparentemente, tal propriedade não sofreu influência do resíduo aplicado, quaisquer que tenham sido os teores utilizados.

Tabela 4.6 - Resultados dos ensaios para determinação do teor de ar incorporado nos traços de concreto – método pressométrico

Traço	Teor de ar incorporado (%)
REF	2,2
S5	2,9
S10	2,6
S15	2,4
S20	3,0

Fonte: Acervo Pessoal.

4.3 Ensaio realizados nos concreto em estado endurecido

A avaliação dos concretos no estado endurecido foi realizada através dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão. Os resultados obtidos nestes ensaios e sua análise estatística são apresentados e discutidos a seguir.

4.3.1 Resistência à compressão axial

Foram testados 4 corpos de prova para cada idade de 3, 7 e 28 dias. Os valores médios de resistência à compressão axial podem ser observados na tabela 4.7.

De acordo com a tabela, é possível observar que nenhum dos traços, independente da idade, possui média em números absolutos que atinja ou supere a resistência à compressão axial do concreto referência, ainda que o concreto S15 apresente o resultado mais próximo na idade de 28 dias. Nas outras idades, porém, a diferença entre os resultados é mais acentuada.

Tabela 4.7 - Resultados dos valores médios de resistência a compressão axial

Traço	Idade (dias)	Resistência média à compressão axial (MPa)	Coefficiente de variação
REF	3	22,8	1,1
	7	28,0	1,5
	28	36,2	1,7
S5	3	22,0	1,5
	7	26,4	1,9
	28	34,0	3,7
S10	3	21,4	4,7
	7	24,8	2,6
	28	34,7	1,2
S15	3	20,9	1,0
	7	25,4	3,6
	28	35,2	0,7
S20	3	18,1	3,6
	7	23,7	4,7
	28	33,4	6,0

Fonte: Acervo Pessoal.

Os dados de resistência à compressão axial foram submetidos a uma análise de variâncias (ANOVA) e avaliadas quanto aos fatores controláveis definidos no modelo estatístico. Os resultados estão resumidos na tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão axial, para os fatores controláveis considerados no modelo estatístico.

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Resultado
Modelo	2043,254	14	145,9467	219,8832	1,92	0,000000	significativo
Erro (resíduo)	29,86860	45	0,663747	--	--	--	--
Total	273,1226	59	--	--	--	--	--
%Substituição	96,11	4	24,03	36,20	2,61	0,000000	significativo
Idade (dias)	1929,37	2	964,68	1453,39	3,23	0,000000	significativo
%Substituição x Idade (dias)	17,78	8	2,22	3,35	2,18	0,000000	significativo
Erro (resíduo)	29,87	45	0,66	--	--	--	--
$R^2_{mod} = 0,98$			$R_{mod} = 0,99$				

Nota:

SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos

Resultado = resultado da análise, indicando se o efeito é significativo ou não

R^2_{mod} = Coeficiente de determinação do modelo; R_{mod} = Coeficiente de correlação do modelo

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A análise de variâncias provou que o modelo fatorial adotado é significativo, já que o valor de Fcal do modelo é maior que o Ftab. O valor resultante de R^2_{mod} comprova que 98% da variação total dos dados é explicada pelo modelo adotado.

Em números absolutos, nas idades de 3 e 7 dias, os concretos S5 demonstraram os melhores resultados à resistência à compressão axial quando comparados ao concreto REF. O mesmo ocorre com o concreto S15 aos 28 dias de cura. Os concretos S20, com maiores teores de resíduo, apresentam os resultados menos favoráveis.

A análise estatística mostrou que os efeitos individuais dos fatores controláveis percentual de substituição e idade, são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 95%. Portanto, pode-se afirmar que cada um desses fatores exerce, isoladamente, influência na resistência à compressão axial.

Uma importante consideração sobre este aspecto diz respeito à intensidade de influência dos fatores. Neste sentido, tomando-se como base a magnitude dos valores de F_{cal} , pode-se constatar que a variável mais influente na resistência à compressão axial foi a idade e sendo o percentual de substituição de influência secundária, embora significativo. A interação entre os fatores controláveis, apesar de também ser significativa é o fator de menor influência.

Com o teste de Tukey, foi possível agrupar os resultados das resistências à compressão axial obtidos na idade de 28 dias, considerando-se cada variável, no intuito de corroborar com as análises de variância. Este teste indicou que, quanto à resistência à compressão axial, os concretos testados dividem-se em três grupos distintos, conforme a tabela 4.9. Isto comprova que o teor de substituição do cimento pelo resíduo de ETE é estatisticamente significativo, conforme identificado pela ANOVA.

Tabela 4.9 - Grupos heterogêneos determinados pelo teste de Tukey, se avaliados entre si os traços quanto à resistência à compressão axial aos 28 dias de idade.

Traço	Médias das resistências à compressão axial aos 28 dias (MPa)	Grupo I	Grupo II	Grupo III
REF	36,17500			*****
S5	33,95000	*****	*****	
S10	34,67500	*****	*****	*****
S15	35,20000		*****	*****
S20	33,35000	*****		

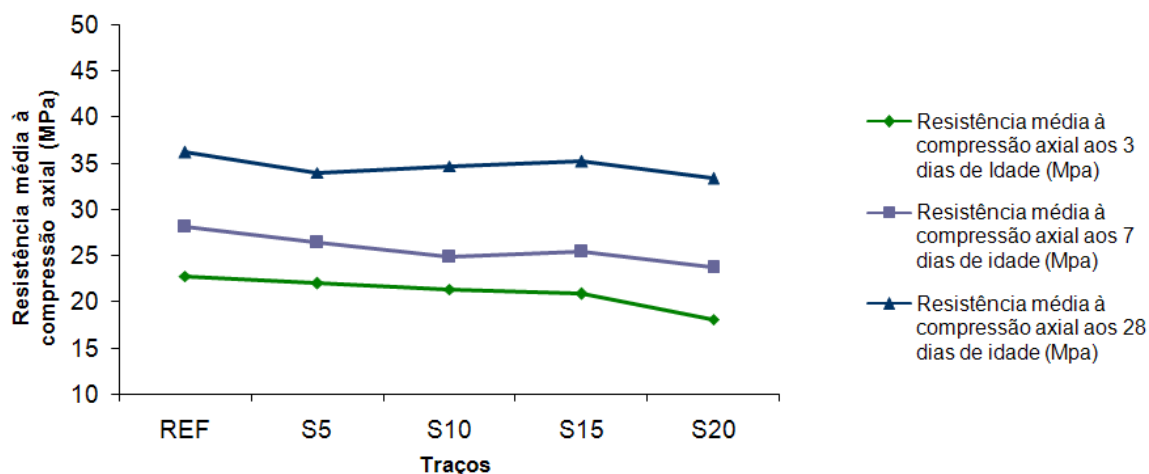
Erro entre SQs: 0,54772; GL: 15

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Representam-se graficamente na figura 4.1 os valores globais de resistência à compressão axial obtidos nos ensaios dos concretos com diferentes teores de substituição, nas idades de 3, 7 e 28 dias.

Ainda que com a mesma idade de cura, todos os concretos obtiveram resistências inferiores ao concreto referência. No entanto, os teores de substituição demonstraram ter influência direta nos valores de resistência à compressão axial, visto que, quanto maiores os percentuais de substituição, menores são os valores de resistência à compressão axial obtidos, ao menos no que tange à idade de 3 dias.

Figura 4.1 - Valores médios globais de resistência à compressão axial dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias em função do percentual de substituição



Fonte: Acervo Pessoal

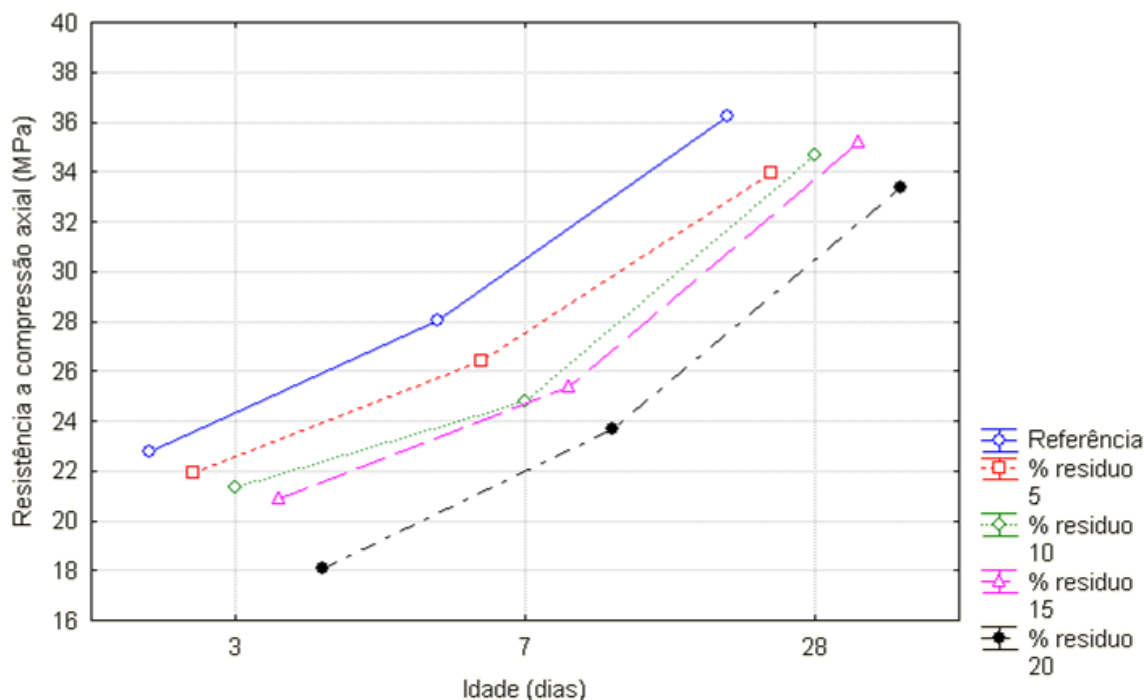
Diferentemente do que ocorreu aos 3 dias de idade, o aumento da resistência à compressão axial em valores absolutos aos 7 dias de idade não ocorreu de forma proporcional ao aumento dos teores de substituição. Nesta rodada de ensaios, os concretos S5 e S15 atingiram maior resistência que os concretos S10. Porém, os valores de resistência obtidos pelos concretos S20 ainda são os menores dentre os concretos estudados.

A maior resistência dos concretos estudados é alcançada na idade de 28 dias. Dentre as misturas, o concreto S15 apresenta-se mais próximo ao concreto referência, atingindo a maior resistência à compressão axial. Admitindo-se que, ainda que secundários, os teores de substituição influenciam nos valores de resistência à compressão axial, pode-se afirmar que a redução dos valores de resistência à compressão axial é proporcional ao aumento das substituições, pois o concreto S20 apresentou valores de resistência inferiores aos outros traços em todas as idades.

Na figura 4.2, está representada a interação da resistência à compressão axial e dos fatores controláveis. Torna-se mais clara a consideração de que, embora o percentual de substituição influencie diretamente na resistência à compressão axial, é a idade o fator de maior influência, visto que independente do percentual de resíduos contido nos concretos, a resistência sempre apresentou aumento em

relação às menores idades de uma mesma mistura, ainda que sem proporção homogênea.

Figura 4.2 - Gráfico representativo de interação de todos os fatores controláveis e dos dados de resistência a compressão axial considerados no modelo estatístico



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Porém, os concretos com maiores quantidades de resíduos apresentam constantemente resultados inferiores aos outros concretos, com menores teores de substituição.

4.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para cada idade foram testados 4 corpos de prova, conforme normatização da NBR 5739 (ABNT, 2007). Os valores médios de resistência podem ser observados na tabela 4.10.

Apesar de nenhum dos concretos com teores de substituição superar o valor da resistência à tração por compressão diametral do concreto referência na idade de 3 dias, os concretos S10 e S15 obtiveram, em médias absolutas, o mesmo valor do

traço referência, enquanto os outros traços alcançaram resultados bem próximos aos 7 dias de idade. No entanto, não se pode afirmar com certeza que os concretos S10 atingiram a mesma resistência, visto que o coeficiente de variação entre os valores dos corpos de prova individualmente ensaiados é muito superior aos outros, quando tratamos deste mesmo parâmetro. Este fato pode ser decorrente também da pequena quantidade de corpos de prova ensaiados, tornando a amostra suscetível a grandes variações em função de um pequeno número de indivíduos. Aos 28 dias, no entanto, apenas o concreto S5 não superou a resistência do concreto referência. As diferenças dos valores absolutos, entretanto, são muito pequenas.

Tabela 4.10 - Resultados dos ensaios de resistência a tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos para cada mistura de concreto endurecido.

Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.			
Traço	Idade (dias)	Resistência média à tração por compressão diametral (MPa)	Coeficiente de variação
REF	3	2,7	1,5
	7	3,0	4,0
	28	3,6	15,8
S5	3	2,4	9,2
	7	2,9	8,0
	28	3,5	5,7
S10	3	2,2	8,2
	7	3,0	11,0
	28	3,8	2,6
S15	3	2,4	9,6
	7	3,0	1,3
	28	3,7	2,4
S20	3	2,4	5,4
	7	2,7	3,7
	28	3,8	2,4

Fonte: Acervo Pessoal

No intuito de investigar a efetiva influência do percentual de substituição de resíduo pelo cimento e da idade nas resistências à tração por compressão axial dos concretos, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

A análise estatística mostrou que o modelo adotado é significativo, já que o valor de F_{cal} é maior que o de F_{tab} . Além disso, o valor de R^2_{mod} foi 0,88.

Através da análise de variância permitiu constatar que o teor de substituição, ainda que associado à idade, não é significativo para a resistência à tração por compressão diametral. Em contrapartida, a idade mostra-se fator estatisticamente significativo, a um nível de confiança de 95% (tabela 4.11).

Tabela 4.11 - Resultado da análise de variância (ANOVA) realizada com os dados de resistência à tração por compressão diametral, para os fatores controláveis considerados no modelo estatístico.

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Resultado
Modelo	547,2844	1	547,2844	10201,12	4,08	0,000000	significativo
Erro (resíduo)	2,4142	45	0,0536	--	--	--	--
Total	549,6986	46	547,338	--	--	--	--
%Substituição	0,1837	4	0,0459	0,86	2,61	0,497702	não significativo
Idade (dias)	16,9182	2	8,4591	157,67	3,23	0,000000	significativo
%Substituição x Idade (dias)	0,80810	8	0,1010	1,88	2,18	0,08551	não significativo
Erro (resíduo)	2,4142	45	0,0536	--	--	--	--
				$R^2_{mod} = 0,88$			
				$R_{mod} = 0,94$			

Nota:

SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática;

F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos

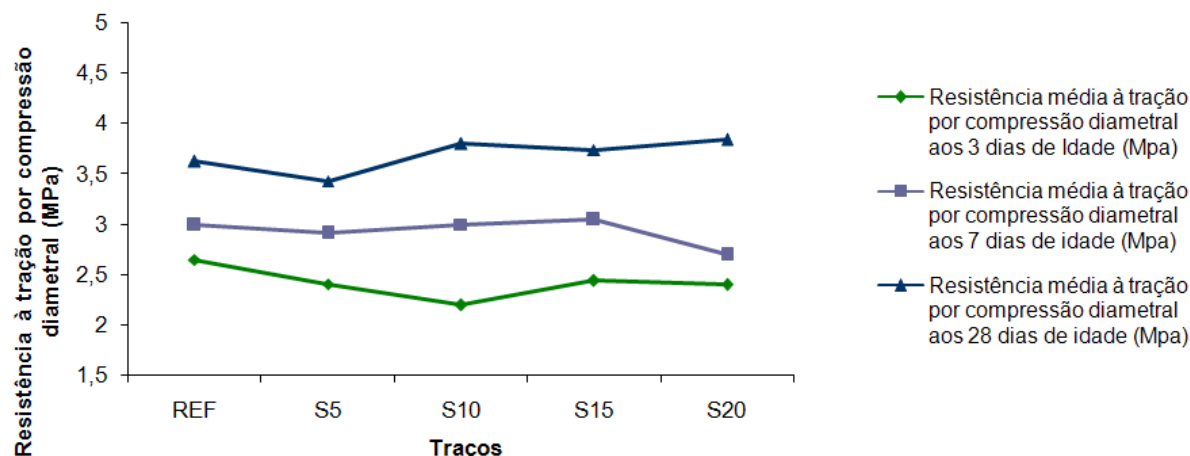
Resultado = resultado da análise, indicando se o efeito é significativo ou não

R^2_{mod} = Coeficiente de determinação do modelo ; R_{mod} = Coeficiente de correlação do modelo

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A figura 4.3 demonstra o comportamento dos concretos estudados nas idades de 3, 7, e 28 dias. É possível observar que o desempenho do concreto S10 aos 3 dias de idade destaca-se por apresentar resultado inferior aos outros. Apesar dos concretos diferirem um pouco em desempenho, não é suficiente para afirmar que estejam em grupos estatisticamente distintos. Conforme demonstrado na tabela 4.11, o percentual de substituição e sua interação com a idade não se apresentam significativos.

Figura 4.3 – Valores médios globais de resistência à tração por compressão diametral dos concretos nas idades de 3, 7 e 28 dias em função do percentual de substituição



Fonte: Acervo Pessoal

Aos 7 dias de idade, quando os concretos com teores de substituição já apresentam desempenho muito próximo ao concreto referência.

Apesar de a análise estatística ter comprovado que o efeito do percentual de substituição do cimento pelo resíduo de ETE não foi significativo, os valores de resistência à tração por compressão diametral aumentaram aos 28 dias de idade, quando a maioria dos concretos ultrapassa, ainda que muito pouco, se analisarmos em números absolutos, o desempenho do concreto referência. Ao contrário do que ocorreu nos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral, os concretos S20 e S10 demonstraram os melhores resultados. Isso se deve, provavelmente, a uma melhora na zona de transição entre o agregado e a pasta, pois o resíduo incorporado à mistura favorece o preenchimento de possíveis vazios na estrutura interna do concreto. Este comportamento pode ser melhor comprovado na análise microestrutural realizada através do MEV.

No decorrer dos ensaios, no entanto, como é possível observar na tabela 4.10, alguns traços apresentaram grande variação nos valores de resistência à tração por compressão diametral entre os corpos de prova ensaiados. Esta diferença pode ser recorrente do manuseio do equipamento.

Os resultados foram submetidos ao teste de Tukey e demonstraram pertencer a um grupo homogêneo, o que significa que as variações e a média dos valores absolutos

obtidos como resultados dos ensaios a que os concretos foram submetidos, bem como os teores de substituição dos concretos não são significativos, como é possível observar na tabela 4.12.

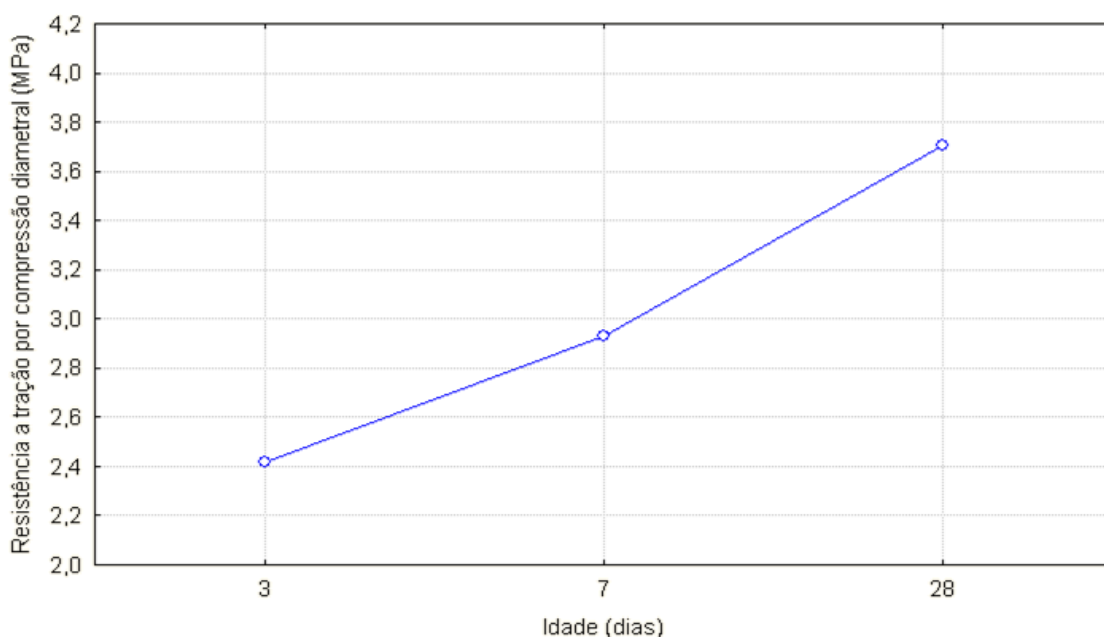
Tabela 4.12 - Grupo homogêneo determinado pelo teste de Tukey, se avaliados entre si os traços quanto à resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias de idade.

Traço	Médias das resistências à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa)	Grupo IV
REF	3,635000	*****
S5	3,530000	*****
S10	3,807500	*****
S15	3,737500	*****
S20	3,842500	*****

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

A figura 4.4 demonstra a magnitude da influência da idade no aumento da resistência à tração por compressão diametral nos corpos de prova, independentemente dos teores de substituição do cimento pelo resíduo de ETE.

Figura 4.4 - Gráfico demonstrativo do aumento da resistência à tração por compressão diametral em função da idade dos concretos



Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

4.3.3 Determinação do módulo estático de elasticidade

Os ensaios foram realizados após os 28 dias de cura dos corpos de prova, conforme determinação da NBR 8522 (ABNT, 2008). Os valores médios do módulo de elasticidade podem ser observados na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade em corpos de prova cilíndricos para cada mistura de concreto endurecido

Resultados dos ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade			
Traço	Idade (dias)	Módulo estático médio de elasticidade (GPa)	Coefficiente de variação
REF	28	30,3	3,3
S5	28	30,0	1,6
S10	28	30,8	3,2
S15	28	31,7	4,4
S20	28	31,9	4,5

Fonte: Acervo Pessoal.

Os concretos ensaiados para a determinação do módulo estático de elasticidade apresentaram resultados próximos ao concreto referência. O coeficiente de variação apresenta-se dentro dos limites aceitáveis, diferentemente do que ocorreu nos ensaios anteriores, principalmente se mencionados os resultados de resistência à tração por compressão diametral, em que o coeficiente de variação de um dos concretos ensaiados atingiu valor superior ao triplo do valor considerado aceitável.

Como no caso da análise do módulo estático de elasticidade não houve variação de idades, a única variável de influência nos resultados obtidos é o teor de substituição utilizado em cada mistura de concreto, sendo apenas estes os parâmetros verificados na análise de variância dos resultados inerentes a esta propriedade. O modelo estatístico adotado é significativo, de acordo com o valor apresentado de F_{cal} , superior ao valor de F_{tab} . Porém, o teor de substituição apresenta-se não significativo para os resultados, como é possível observar na tabela 4.14.

Apesar de os valores apresentarem-se inesperadamente próximos, em função dos resultados obtidos anteriormente nos ensaios de resistência à compressão axial, foi realizado o teste de Tukey, que confirmou que os resultados das médias pertencem a um mesmo grupo homogêneo.

Tabela 4.14 - Análise de variância (ANOVA) realizada com os resultados de módulo de elasticidade à compressão, para os fatores controláveis considerados no modelo estatístico.

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F cal	F tab	p	Resultado
Modelo	14333,89	1	14333,89	9141,631	4,96	0,000000	significativo
Erro(resíduo)	15,68	10	1,57	--	--	--	--
Total	14349,57	11	14335,46	--	--	--	--
%Substituição	8,37	4	2,09	1,334	3,48	0,322978	não significativo
Erro (resíduo)	15,68	10	1,57	--	--	--	--
$R^2_{mod} = 0,08$				$R_{mod} = 0,59$			

Nota:

SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática;

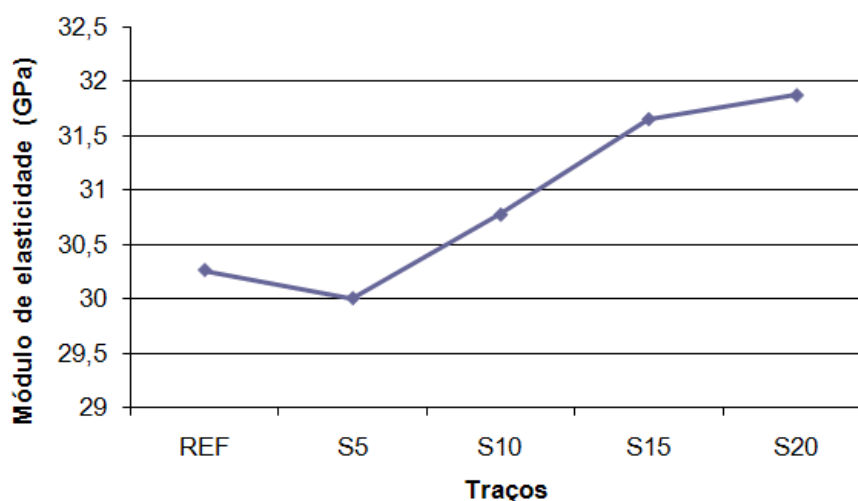
F = Parâmetro de Fischer para o teste de significância dos efeitos

Resultado = resultado da análise, indicando se o efeito é significativo ou não

R^2_{mod} = Coeficiente de determinação do modelo ; R_{mod} = Coeficiente de correlação do modelo

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Figura 4.5 - Gráfico demonstrativo do aumento do módulo de elasticidade em função do teor de substituição



Fonte: Acervo Pessoal

Mesmo com tal proximidade de resultados entre os diferentes concretos, uma leve tendência de aumento foi notada nos concretos com maiores teores de substituição (figura 4.5), apesar da não significância apontada pela análise de variâncias.

Nota-se pequena queda no valor do módulo estático de elasticidade nos concretos S5, condição que se inverte nos outros concretos, que apresentam valores

diretamente proporcionais aos teores de substituição no que tange a esta propriedade.

4.4 Resultados de caracterização da microestrutura

O estudo da microestrutura é muito importante, pois contribui para o entendimento das relações existentes entre microestrutura-defeitos-propriedades e permite prever as propriedades dos materiais quando estas relações são estabelecidas (DAL MOLIN, 2007).

A caracterização da microestrutura é de grande utilidade para avaliar o comportamento do resíduo de vidro no concreto, entretanto não se deve esquecer que as análises e observações são realizadas em amostras de pequenas dimensões. Isto significa que os minerais detectados realmente estão presentes, mas os não detectados podem ou não existir no concreto (DAL MOLIN, 2007). Isto porque, para a realização dos ensaios, são retiradas do núcleo do corpo de prova pequenas amostras, de, no máximo, 1 cm de diâmetro. Tendo em vista o tamanho do corpo de prova e a quantidade de compósitos nele presentes, as amostras são escolhidas de modo a conter, pelo menos a olho nu, a maior quantidade de elementos a serem observados, procurando priorizar sempre as amostras que permitam a análise das zonas de transição e interface. É possível, portanto, que nesta pequena amostra coletada alguns dos compostos minerais estejam ausentes, apesar de existirem no corpo de prova.

Nos estudos de microestrutura do concreto, a interface torna-se essencial por distinguir a aderência de natureza química reativa às ligações cristalinas entre a pasta e o agregado e a aderência mecânica devido à rugosidade superficial dos agregados (PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

Conforme Pereira Neto, Fonseca e Djanikian (1996), O CSH (silicato de cálcio hidratado) é responsável pelo aumento de resistência mecânica à compressão, e o CH (hidróxido de cálcio) resulta da reação de hidratação do cimento Portland. Porém, quando em presença de sílica amorfa (SiO₂) podem ocorrer reações pozolânicas que também são responsáveis pela formação do CSH:



(Equação 12)

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a morfologia do C-S-H varia desde fibras cristalinas até redes reticulares. Existem os chamados produtos internos, predominantes em pastas com mais idades, e os produtos externos, predominantemente encontrados nos estágios iniciais de hidratação, que podem apresentar morfologia fibrosa ou estrutura de colméia de abelha ou reticular. Afirmam ainda que a principal fonte de resistência nos produtos sólidos na pasta de cimento hidratada é a existência da força de atração de Van der Waals e que a aderência entre duas superfícies sólidas pode ser atribuída a essas forças físicas, sendo o grau de ação de adesão dependente da extensão e da natureza das superfícies envolvidas.

Os autores afirmam ainda que por possuírem grandes áreas superficiais, os cristais de C-S-H tendem a aderir fortemente não apenas aos sulfoaluminatos de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratado, como também aos sólidos de área superficial (hidróxido de cálcio, grãos de clínquer anidro e partículas de agregado graúdo e miúdo). Porque na pasta de cimento hidratado o espaço intralamelar da estrutura do C-S-H e os pequenos vazios estão sob influência das forças de atração de Van der Waals não são considerados prejudiciais à resistência, em função da grande concentração de tensão que provocam na zona de transição, fato que pode ser atribuído também ao preenchimento de vazios criados pelos grandes cristais de etringita e de hidróxido de cálcio.

Neste estudo, foram observadas as pastas cimentícias e os concretos correspondentes de diferentes teores de substituição, após os 28 dias de idade.

4.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os resultados da microscopia eletrônica de varredura, juntamente com o EDS (Espectômetro de Energia Dispersiva), são registrados sob a forma de microfractografias e de diagramas, respectivamente. Estes diagramas mostram a composição química elementar de um ponto ou uma região observados na microfractografia.

O uso do MEV combinado com o EDS possibilitou a visualização de cristais e sua identificação, além de uma visão quanto a homogeneidade das pastas cimentícias e

dos concretos, mais especificamente da matriz cimentícia dos concretos e da interface desta com o agregado.

As imagens obtidas pela análise dos concretos foram direcionadas para o local mais próximo ao agregado, de forma que com as ampliações sucessivas, fosse possível observar a zona de transição entre o agregado e a matriz cimentícia dos concretos.

4.4.1.1 Análise microestrutural das pastas cimentícias

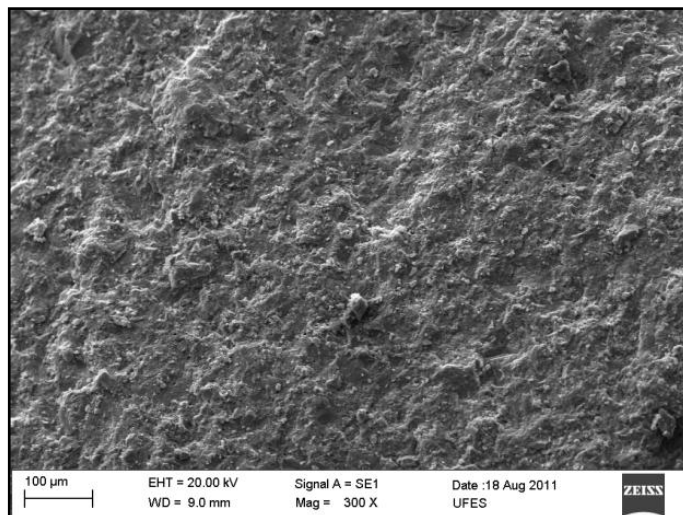
Neste trabalho, apresentou-se uma sequência de experimentos que envolve, respectivamente, pastas cimentícias e concretos com traços que se diferenciam de acordo com os teores de substituição do cimento Portland CPV ARI RS pelo resíduo de ETE, de composição química muito próxima ao vidro e de granulometria muito fina. Por isso, também a análise microestrutural seguiu esta mesma hierarquia.

Em um primeiro momento foi analisada a microestrutura das pastas cimentícias, no intuito de observar se a inserção do resíduo de ETE provocou mudanças na homogeneidade das misturas e se houve variação conforme a diferenciação dos teores de substituição do cimento pelo resíduo em questão. Porém, os ensaios das pastas de cimento neste trabalho foram preliminares ao estudo dos concretos e foram realizados apenas no intuito de observar o comportamento interativo do cimento utilizado com o resíduo de ETE, para avaliar sua aplicação posterior em concretos e as possibilidades de prosseguir com este estudo, visto que o foco deste trabalho é a avaliação da aplicação do resíduo na produção de concretos.

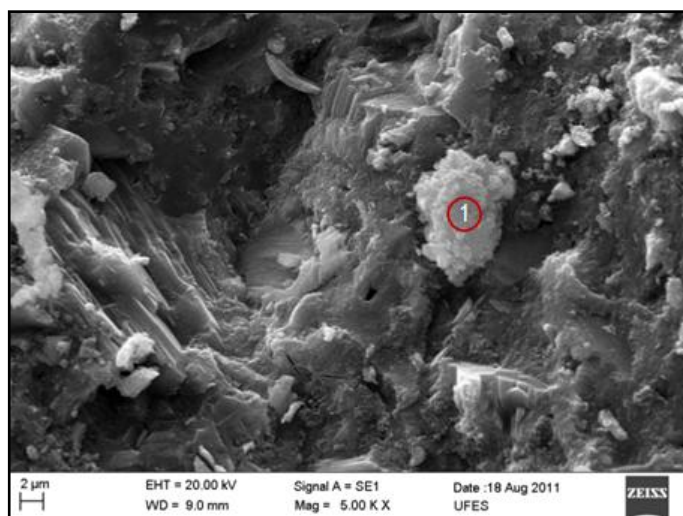
Todas as pastas foram analisadas com idades superiores a 28 dias. No entanto, por limitações de cunho técnico intrínsecas ao processo, em algumas pastas não foi possível realizar a análise de EDS.

Na figura 4.6 estão as imagens obtidas por MEV das pastas cimentícias de traço referência após os 28 dias de cura. Na imagem ampliada em 300 vezes (a), observa-se claramente a homogeneidade e a compacidade da pasta, sem poros visíveis ou microfissuras, característica atípica para a relação a/c adotada.

Figura 4.6 – Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço referência, com ampliações de 300 vezes (a) e de 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS.



(a)

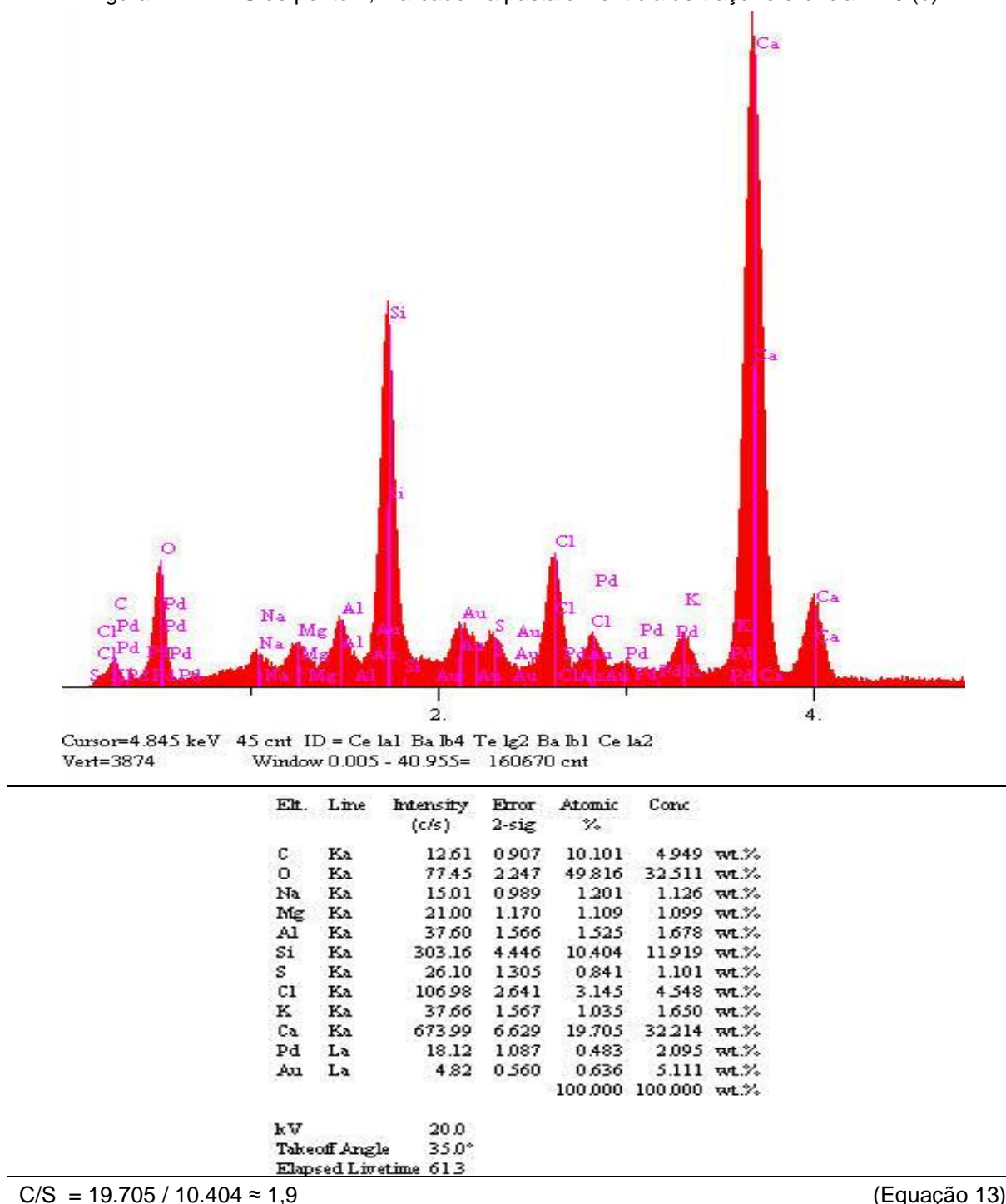


(b)

Fonte: Acervo Pessoal

Na imagem ampliada em 5000 vezes (b), foi marcado um ponto de análise para o EDS (figura 4.7), que apresentou alta relação cálcio/sílica (C/S) para pastas com idade acima de 28 dias.

Figura 4.7 – EDS do ponto 1, marcado na pasta cimentícia de traço referência 4.10 (b)

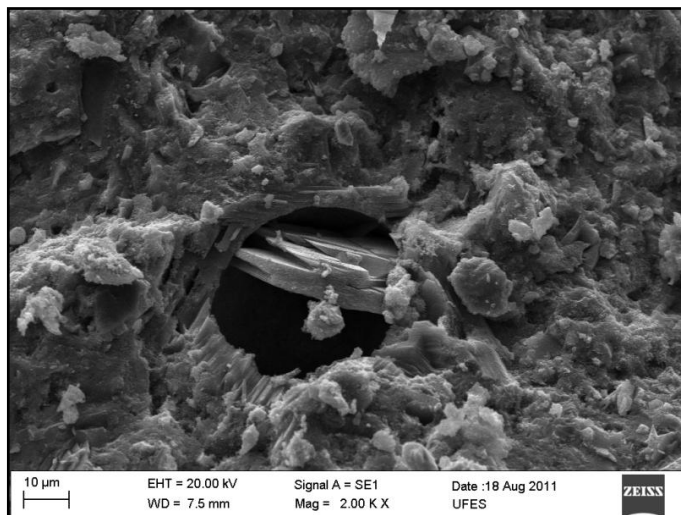


Fonte: Acervo Pessoal

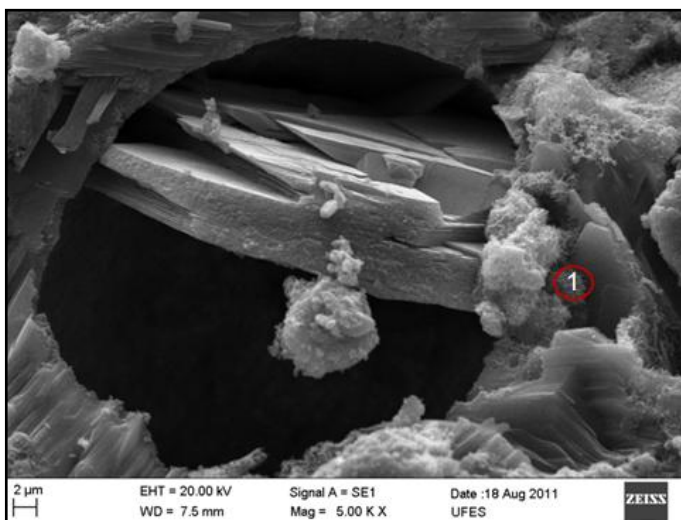
A figura 4.8 apresenta imagens da pasta de traço S5, mais fragmentada e porosa ampliada em 2000 e em 5000 vezes. Porém, nota-se claramente a formação cristalina de hidróxido de cálcio ocupando o interior de um poro, como o destacado

em (b), fato este que reduz a porosidade total, aumentando a densidade e, conseqüentemente, a resistência das pastas.

Figura 4.8 – Imagens obtidas por MEV das pastas cimentícias de traço S5, com ampliações de 2000 vezes (a) e 5000 vezes (b), onde o ponto 1 foi marcado para análise de EDS



(a)

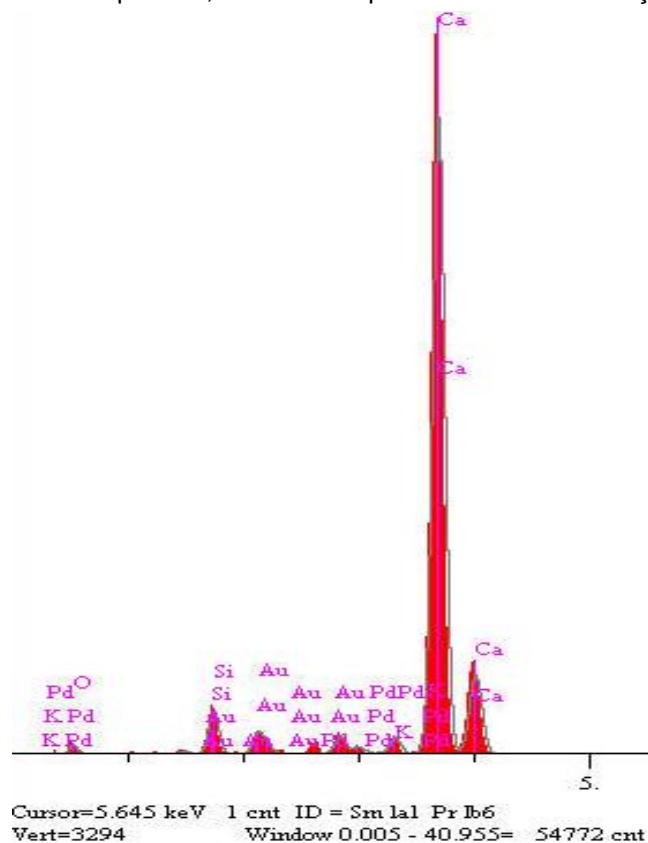


(b)

Fonte: Acervo Pessoal

A análise de EDS (figura 4.9) demonstra que o cristal de hidróxido de cálcio identificado apresenta uma relação C/S de aproximadamente 15, maior que a pasta referência.

Figura 4.9 – EDS do ponto 1, marcado na pasta cimentícia de traço S5 (4.12b)



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc
O	Ka	823	0871	23.895	10.279 wt.%
Na	Ka	132	0349	0.313	0.194 wt.%
Al	Ka	352	0570	0.407	0.295 wt.%
Si	Ka	4741	2092	4.475	3.380 wt.%
K	Ka	1909	1327	1.218	1.280 wt.%
Ca	Ka	858.51	8.902	66.954	72.150 wt.%
Pd	La	20.68	1.382	0.852	2.438 wt.%
Au	La	535	0.703	1.885	9.984 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 433

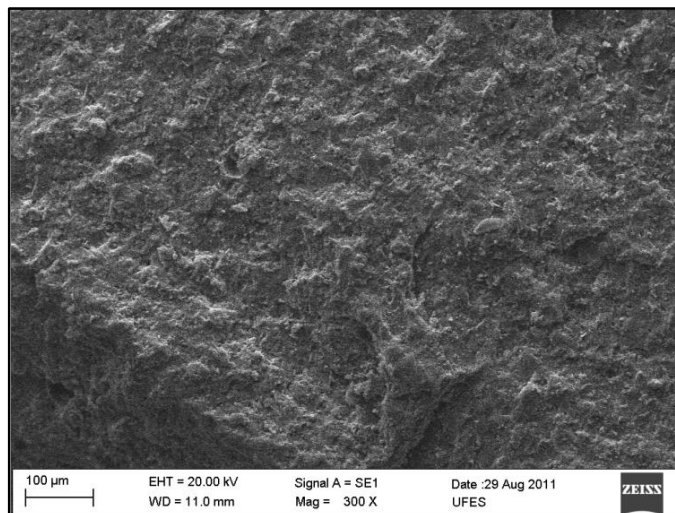
$$C/S = 66,954 / 4.475 \approx 15$$

(Equação 14)

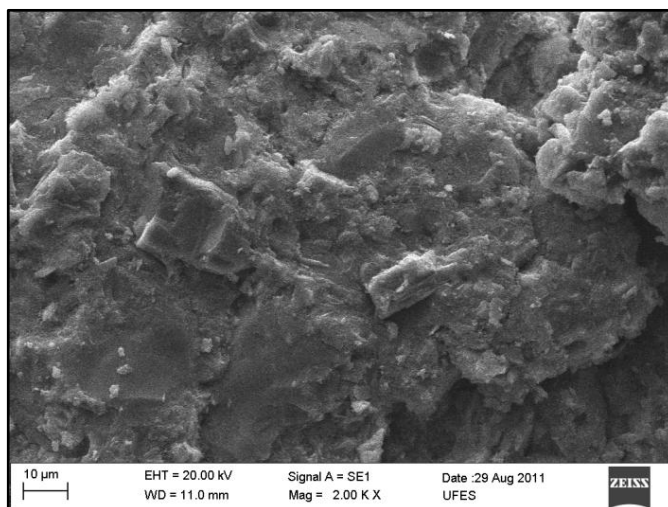
Fonte: Acervo Pessoal

Nas imagens da pasta cimentícia de traço S10 (figura 4.10), observa-se maior homogeneidade e menor fragmentação e porosidade quando comparada à pasta de traço S5, tanto quando ampliadas em 300 vezes, como nas ampliações de 2000 vezes. Também a formação de alguns cristais já é mais perceptível que nas pastas analisadas anteriormente.

Figura 4.10 – Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço S10, com ampliações de 300 vezes (a) e de 2000 vezes (b)



(a)

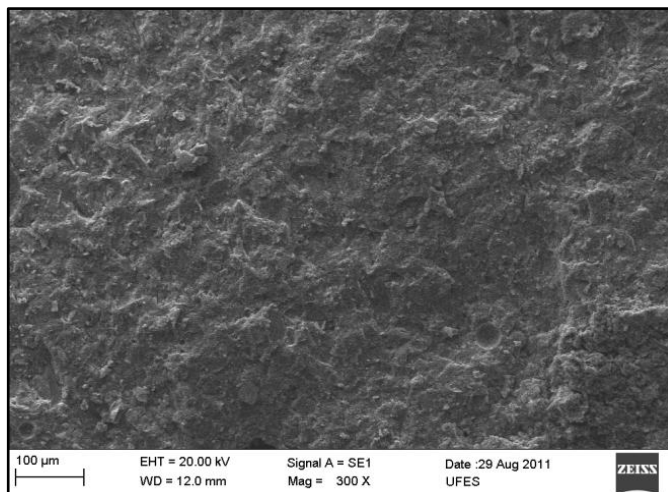


(b)

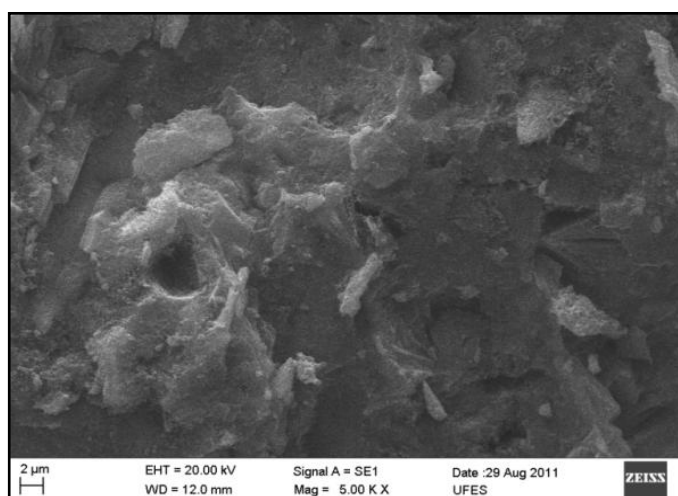
Fonte: Acervo Pessoal

As imagens analisadas das pastas cimentícias de traço S15 (figura 4.11), com ampliações de 300 vezes e de 5000 vezes, também apresentam boa densidade, pouca porosidade e maior uniformidade em relação às outras pastas. Entretanto, não há grande diferença quanto à formações cristalinas observadas nas pastas de traço S10, ainda que estas possam ser notadas.

Figura 4.11 – Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço S15, com ampliações de 300 vezes (a) e em 5000 vezes (b)



(a)



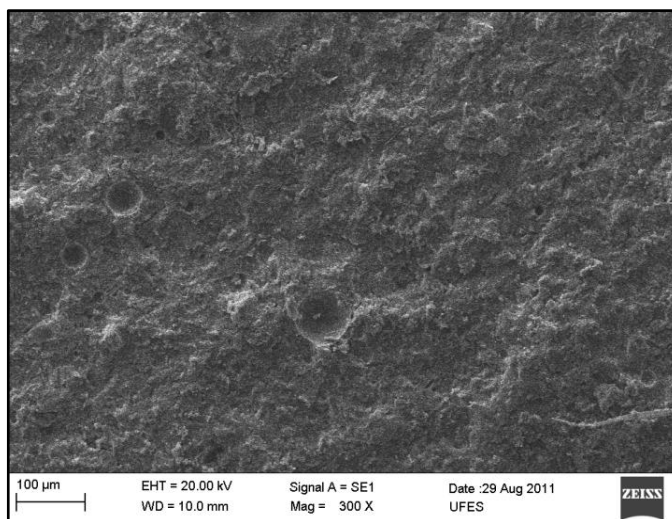
(b)

Fonte: Acervo Pessoal

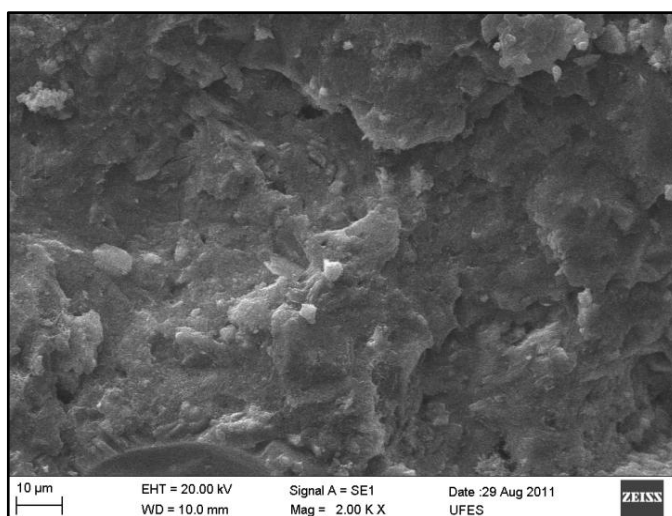
As imagens das pastas cimentícias de traço S20 dispostas na figura 4.12 foram ampliadas em 300 e em 2000 vezes.

Apresentam aparência um pouco mais rugosa e porosa quando comparadas às pastas de traço S15. No entanto, se comparadas às pastas de traço S5, anteriormente analisadas neste estudo, apresentam menor rugosidade e porosidade visíveis.

Figura 4.12 – Imagens obtidas por MEV da pasta cimentícia de traço S20, com ampliações de 300 vezes (a) e de 2000 vezes (b).



(a)



(b)

Fonte: Acervo Pessoal

A análise microestrutural das pastas cimentícias permitiu notar a formação de cristais e comparar a diferença de comportamento dos diversos teores de resíduo aplicados neste estudo.

As pastas cimentícias S5 apresentaram maior porosidade e fragmentação em relação a todas as outras pastas estudadas. As pastas de traço S10 e S15 apresentaram-se visualmente muito parecidas no que tange à densidade e à homogeneidade, além de exibir mais formações cristalinas que as demais pastas.

Apesar do resultado menos satisfatório apresentado pelas imagens obtidas das pastas de traço S20 em função da presença de porosidade e rugosidade acima dos padrões desejados, esta ainda demonstrou-se mais densa e homogênea que as pastas de traço S5.

4.4.1.2 Análise microestrutural dos concretos

A análise microestrutural dos concretos teve como foco principal a interface entre os agregados graúdos e a matriz cimentícia dos concretos, visando observar as consequências da substituição do cimento pelo resíduo de ETE e se houve melhoria na interação destes compósitos, o que incrementaria a resistência dos concretos e comprovaria os efeitos benéficos da aplicação do resíduo de ETE na produção de concretos.

Bem como as pastas cimentícias, os concretos foram analisados após a idade de 28 dias e as amostras foram retiradas de corpos de prova utilizados em ensaios anteriores, já rompidos para a obtenção dos valores de resistência à compressão axial.

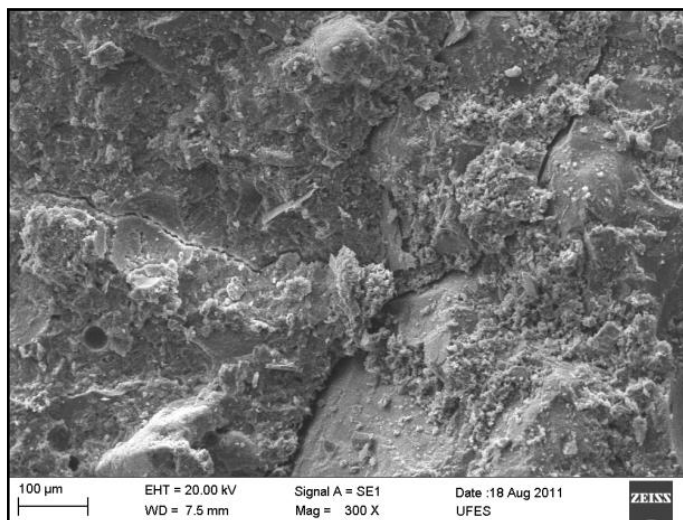
Nas imagens obtidas para os concretos de traço S5 e S20, algumas distorções serão notadas. Tais distorções são recorrentes de falhas no processamento da imagem, em função da topografia da amostra.

A figura 4.13 apresenta imagens do concreto de traço referência. Visualmente, o concreto referência apresenta boa densidade e homogeneidade, sem porosidade prejudicial. As imagens analisadas foram ampliadas em 300 vezes, onde uma região da matriz cimentícia do concreto foi escolhida para apontar o equipamento de EDS. Apenas após a identificação do ponto a ser analisado, foi feita a ampliação da imagem em 5000 vezes. O ponto escolhido para a análise foi determinado por ter sido observada a presença de cristais na região que o contém.

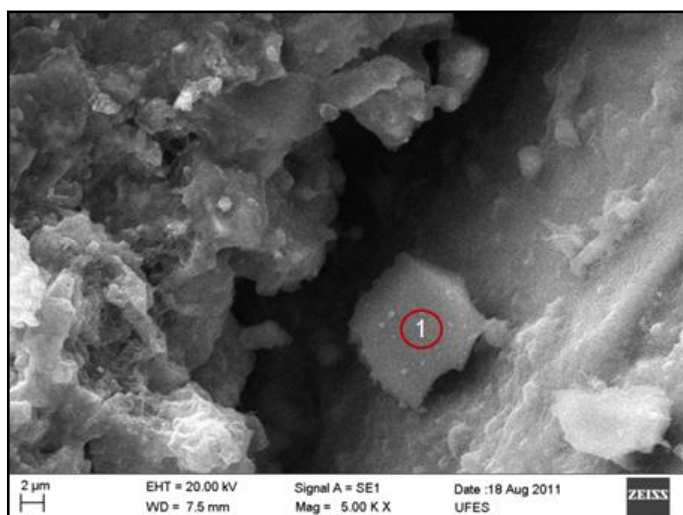
A análise de EDS (figura 4.14) identificou que os cristais observados no concreto referência apresentam-se ricos em cálcio e sílica, em uma relação C/S de aproximadamente 4,6, considerada alta, sendo, porém, típica de matrizes cimentícias de concretos sem adições pozolânicas.

A presença dos cristais foi detectada justamente em uma zona de transição, região que tende a ser mais frágil nas estruturas em concreto. Entretanto, a presença destes tipos de cristais nestas regiões de transição tende a proporcionar melhoria da aderência sólido-sólido, beneficiando as propriedades relativas à resistência mecânica e durabilidade dos concretos.

Figura 4.13 – Imagens obtidas por MEV do concreto referência ampliadas em 300 (a) e em 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS



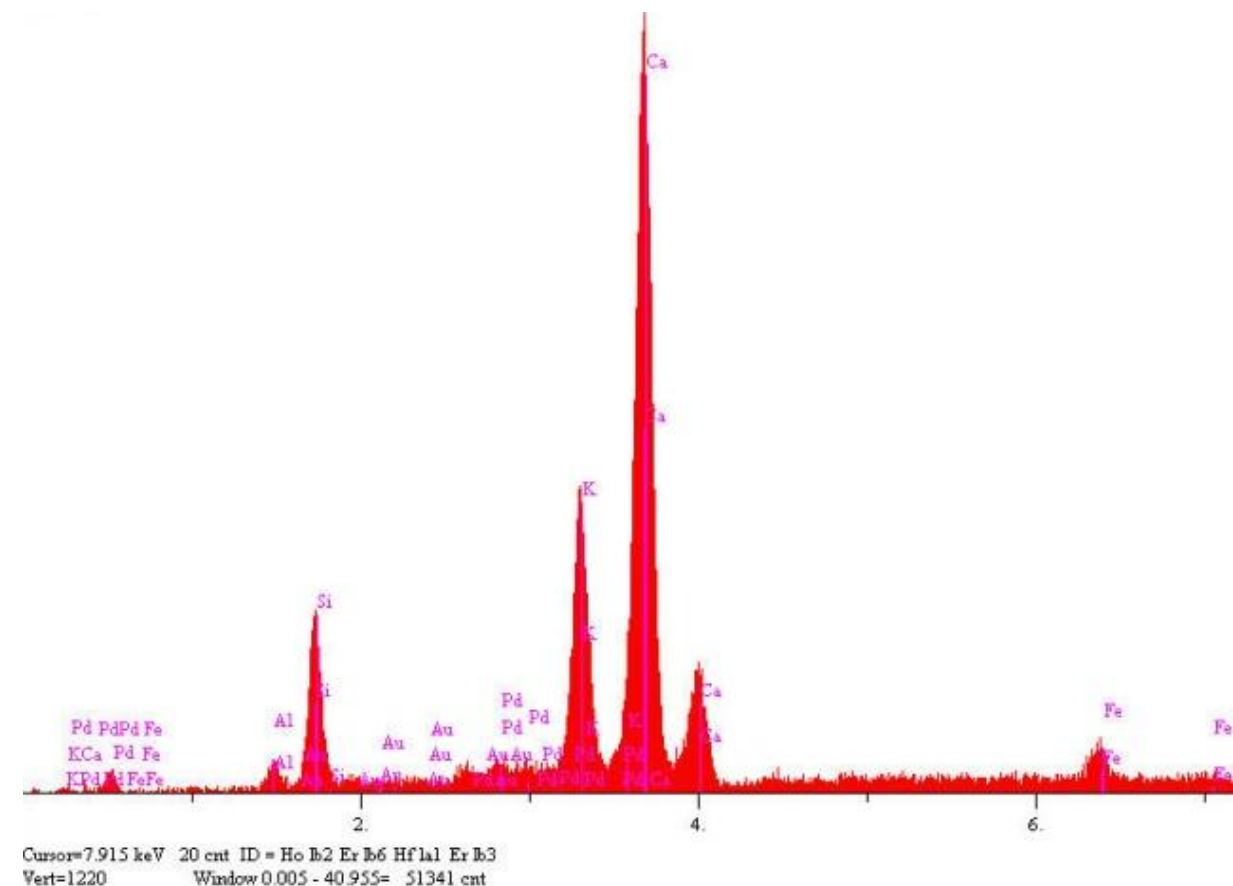
(a)



(b)

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4.14 – EDS do ponto 1 marcado na figura 4.13 (b), relativa à amostra do concreto referência.



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc
Al	Ka	331	0.364	2.075	1325 wt.%
Si	Ka	24.71	0.994	13.001	8.641 wt.%
K	Ka	46.59	1.365	18.252	16.889 wt.%
Ca	Ka	129.62	2.277	60.472	57.357 wt.%
Fe	Ka	6.16	0.496	3.668	4.848 wt.%
Pd	La	1.37	0.234	0.403	1.014 wt.%
Au	La	1.09	0.209	2.129	9.926 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 100.0

$$C/S = 60,472 / 13,001 \approx 4,6$$

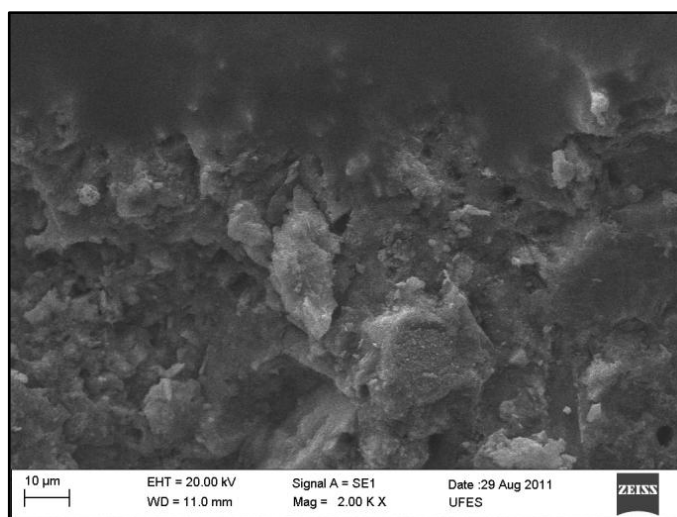
(Equação 15)

Fonte: Acervo Pessoal

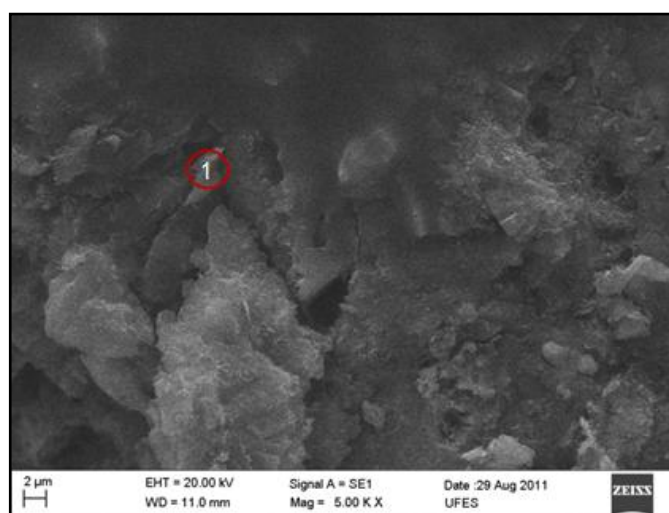
As imagens ampliadas em 2000 e em 5000 vezes obtidas pelo MEV da amostra de traço de concreto S5 apresentaram muitos poros quando observado microscopicamente (figura 4.15), fato já esperado devido aos resultados dos ensaios onde foram rompidos os corpos de prova, onde grande porosidade foi percebida,

mesmo a olho nu. Este pode ser o motivo pelo qual o concreto S5 demonstrou propriedades mecânicas inferiores aos outros concretos quando analisado em um contexto geral.

Figura 4.15 – Imagens obtidas por MEV do concreto de traço S5, ampliadas em 2000 vezes (a) e em 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS



(a)



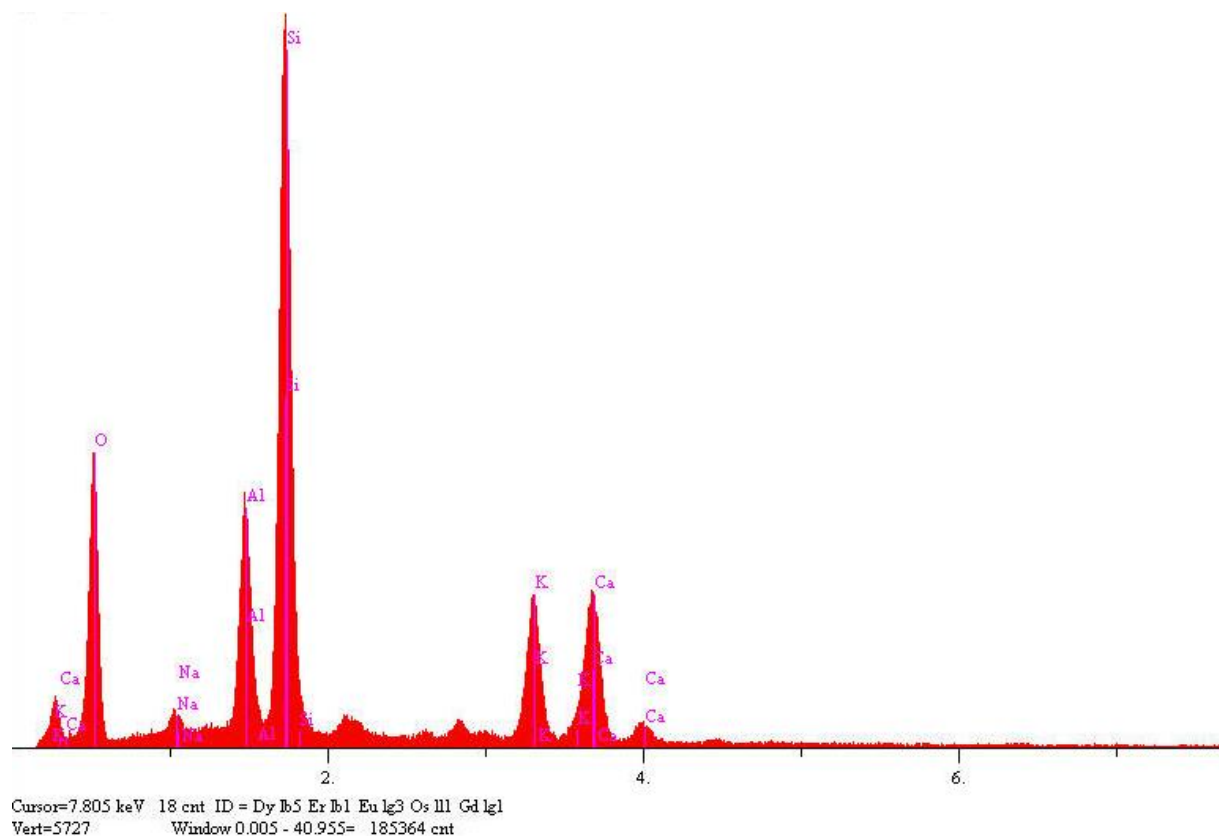
(b)

Fonte: Acervo Pessoal

Ainda não são observadas formações consideráveis de ligação cristalina e aderência mecânica entre a matriz cimentícia do concreto e o agregado graúdo. O fato de que a resistência na região de contato entre a matriz cimentícia do concreto e o agregado graúdo possa ser menor do que a resistência do próprio agregado ou mesmo da matriz cimentícia, fará com que ela se torne uma zona frágil no

desenvolvimento da resistência dos concretos produzidos com este teor de substituição. O EDS (figura 4.16) demonstra relação C/S de aproximadamente 0,22.

Figura 4.16 – EDS do ponto 1, marcado na figura 4.15 (b), relativa à amostra do concreto S5



El.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc
O	Ka	201.53	3.493	60.943	43.236 wt.%
Na	Ka	20.46	1.113	1.194	1.218 wt.%
Al	Ka	234.45	3.768	7.007	8.384 wt.%
Si	Ka	742.26	6.704	21.111	26.290 wt.%
K	Ka	178.61	3.289	4.150	7.195 wt.%
Ca	Ka	194.27	3.430	4.692	8.338 wt.%
Fe	Ka	3.61	0.467	0.109	0.270 wt.%
Pd	La	17.14	1.019	0.463	2.187 wt.%
Au	La	3.13	0.435	0.330	2.883 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 66.1

$$C/S = 4,692 / 21,111 \approx 0,22$$

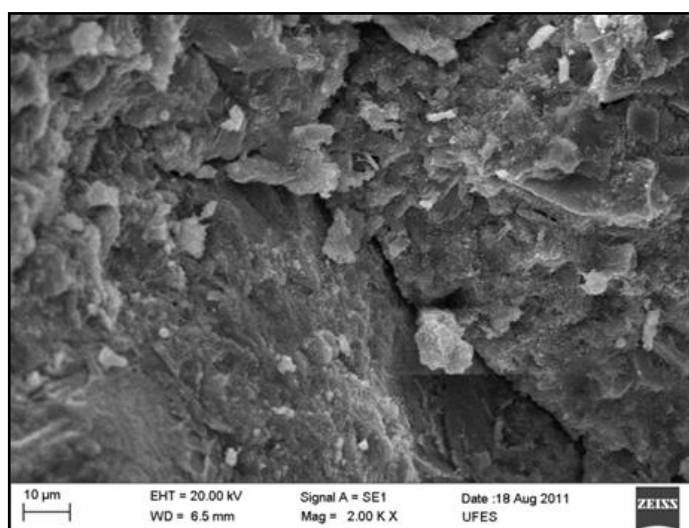
(Equação 16)

Fonte: Acervo Pessoal

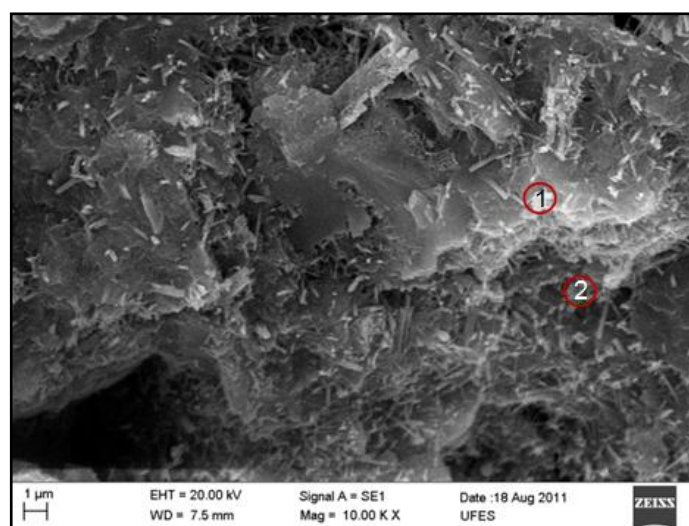
As imagens obtidas pelo MEV da amostra de concreto de traço S10 aparece na figura 4.17, em que se pode constatar a existência de uma região com muitos

cristais aciculares. Percebe-se que mesmo com a presença da sílica amorfa no resíduo de vidro, esta ainda não se apresenta totalmente combinada para a formação do C-S-H. Porém, ela ocupa um espaço onde poderia existir um poro, o que pode estar tornando a matriz cimentícia do concreto ou até mesmo a interface pasta-agregado mais densas e menos porosas.

Figura 4.17 – Imagens obtidas por MEV da amostra de concreto de traço S10, ampliadas em 2000 vezes (a) e em 10000 vezes (b), onde estão marcados os pontos 1 e 2, para análise de EDS



(a)



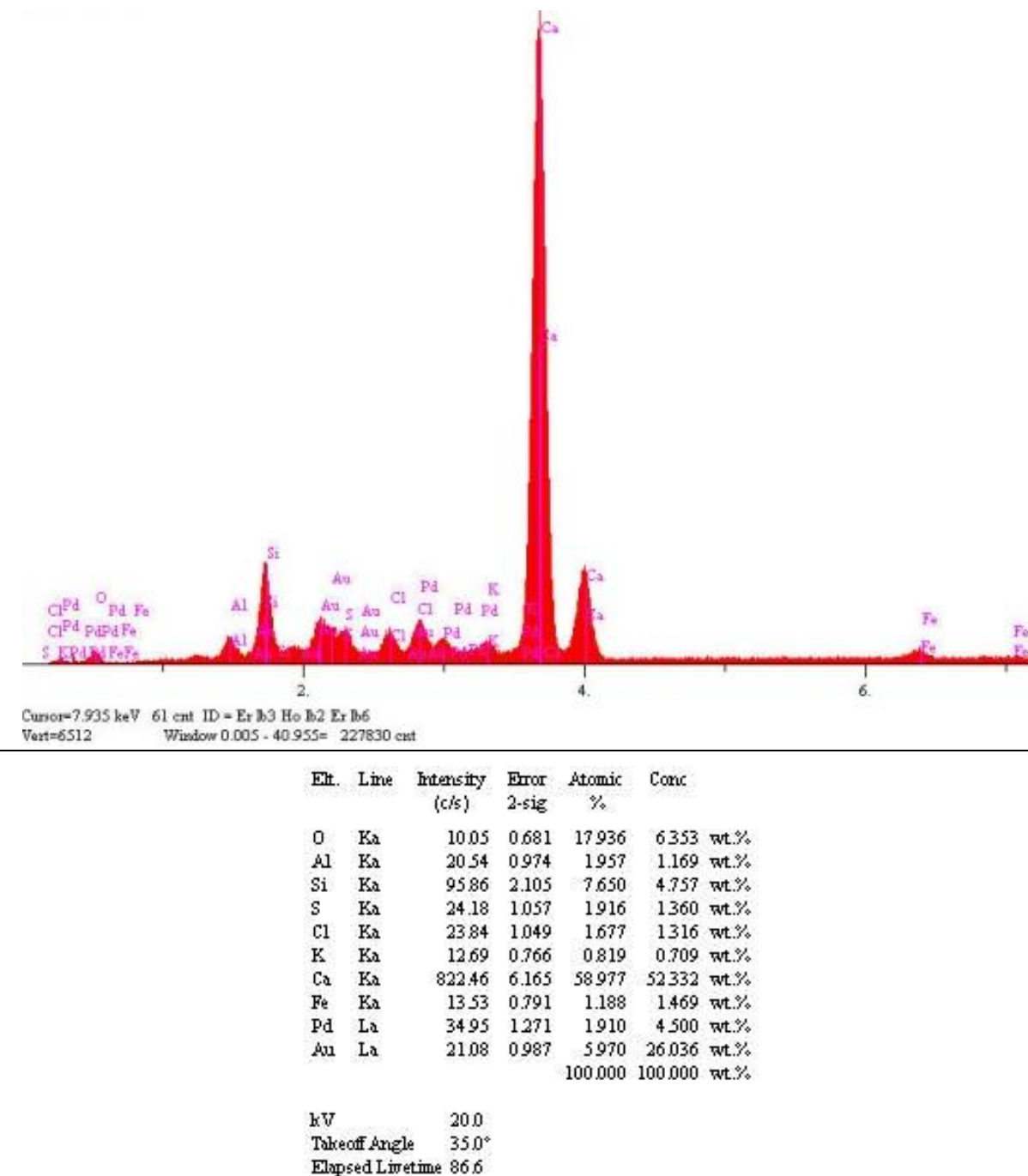
(b)

Fonte: Acervo Pessoal

Os pontos para análise do EDS marcados nas imagens da figura 4.17 foram escolhidos em função do acúmulo de cristais aciculares e da necessidade de

conhecer sua composição de forma detalhada, além de investigar a relação C/S destes pontos específicos.

Figura 4.18 - EDS do ponto 1, marcado na figura 4.17 (b), relativa à amostra do concreto S10



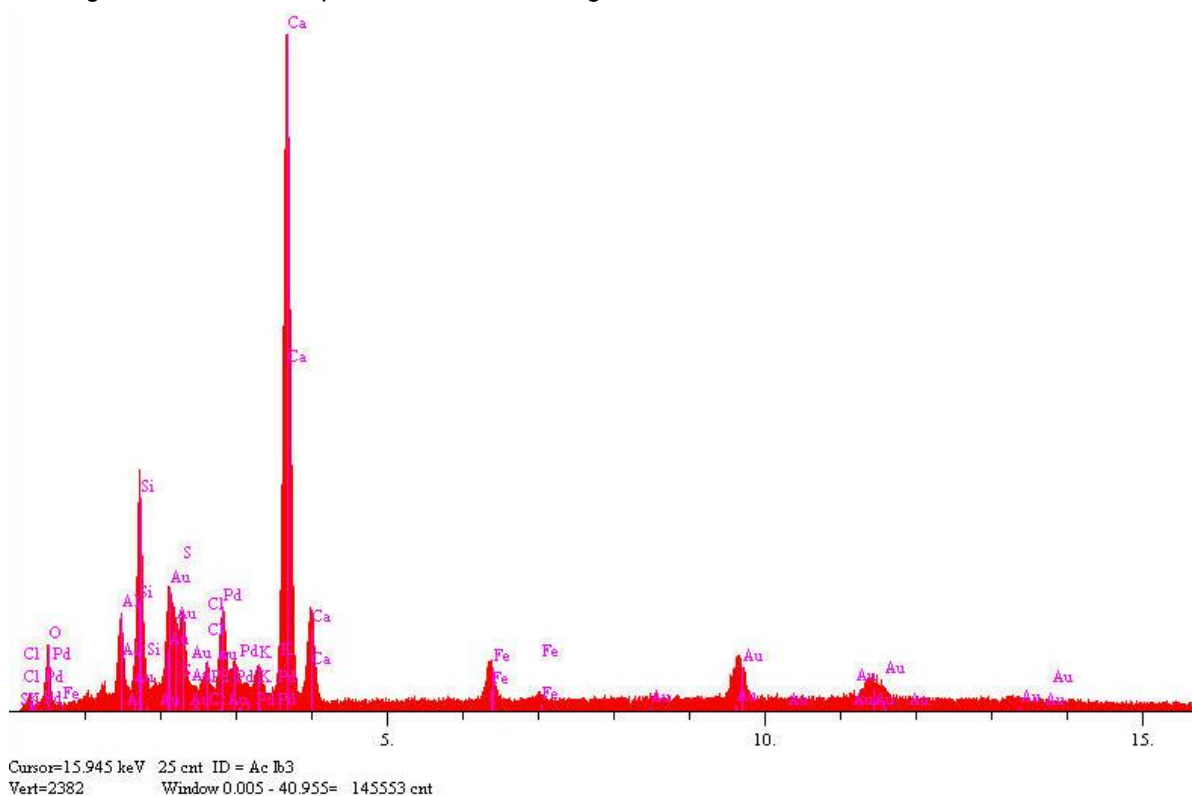
$$C/S = 58,977 / 7,650 \approx 7,7$$

(Equação 17)

Fonte: Acervo Pessoal

Conforme observado nas figuras 4.18 e 4.19, a análise de EDS demonstrou um valor de aproximadamente 7,7 para a relação C/S no ponto 1 da amostra de concreto S10 e para o ponto 2, uma relação C/S de aproximadamente 3,6. Apenas visualmente já é possível justificar tal diferença, visto que é possível observar maior quantidade de cristais aciculares no ponto 1 do que no ponto 2.

Figura 4.19 - EDS do ponto 2, marcado na figura 4.17b, relativa à amostra do concreto S10



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc
O	Ka	2393	1254	30.149	9.682 wt.%
Al	Ka	40.69	1.635	4.012	2.173 wt.%
Si	Ka	111.78	2.710	9.423	5.312 wt.%
S	Ka	42.14	1.664	3.844	2.474 wt.%
Cl	Ka	12.08	0.891	0.975	0.694 wt.%
K	Ka	14.17	0.965	1.076	0.844 wt.%
Ca	Ka	425.12	5.286	34.131	27.457 wt.%
Fe	Ka	29.44	1.391	2.598	2.912 wt.%
Pd	La	41.95	1.660	3.344	7.143 wt.%
Au	La	36.96	1.559	10.448	41.309 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 60.9

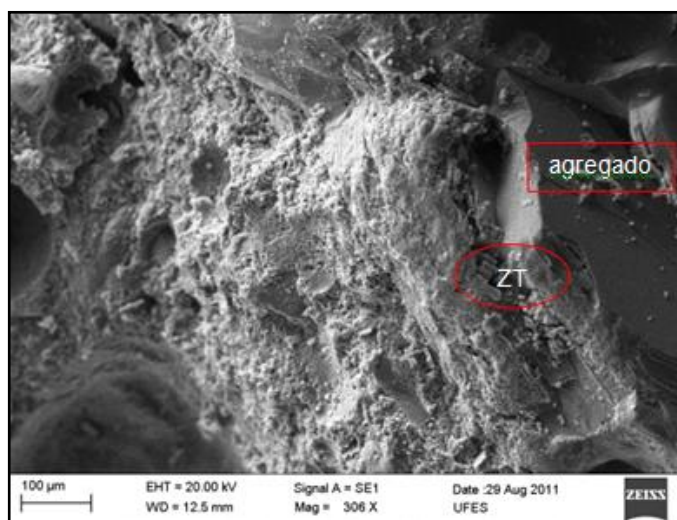
$$C/S = 34,131 / 9,423 \approx 3,6$$

(Equação 18)

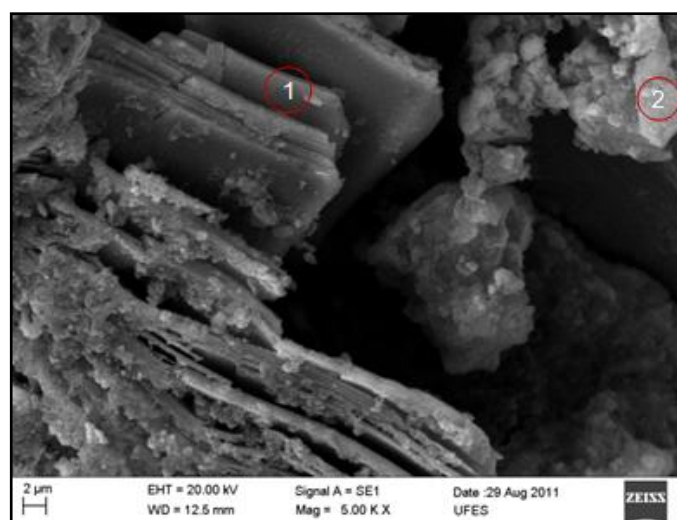
Fonte: Acervo Pessoal

As imagens produzidas com as amostras do concreto de traço S15, observadas na figura 4.20, apontam o agregado graúdo e a zona de transição (ZT) com a matriz cimentícia do concreto. A zona de transição desta amostra se apresenta repleta de cristais de C-S-H bem compactos.

Figura 4.20 - Imagens obtidas por MEV da amostra de concreto de traço S15, ampliadas em 306 vezes (a) e em 5000 vezes (b). Pontos 1 e 2 marcados para análise de EDS na figura 4.21 (b)



(a)



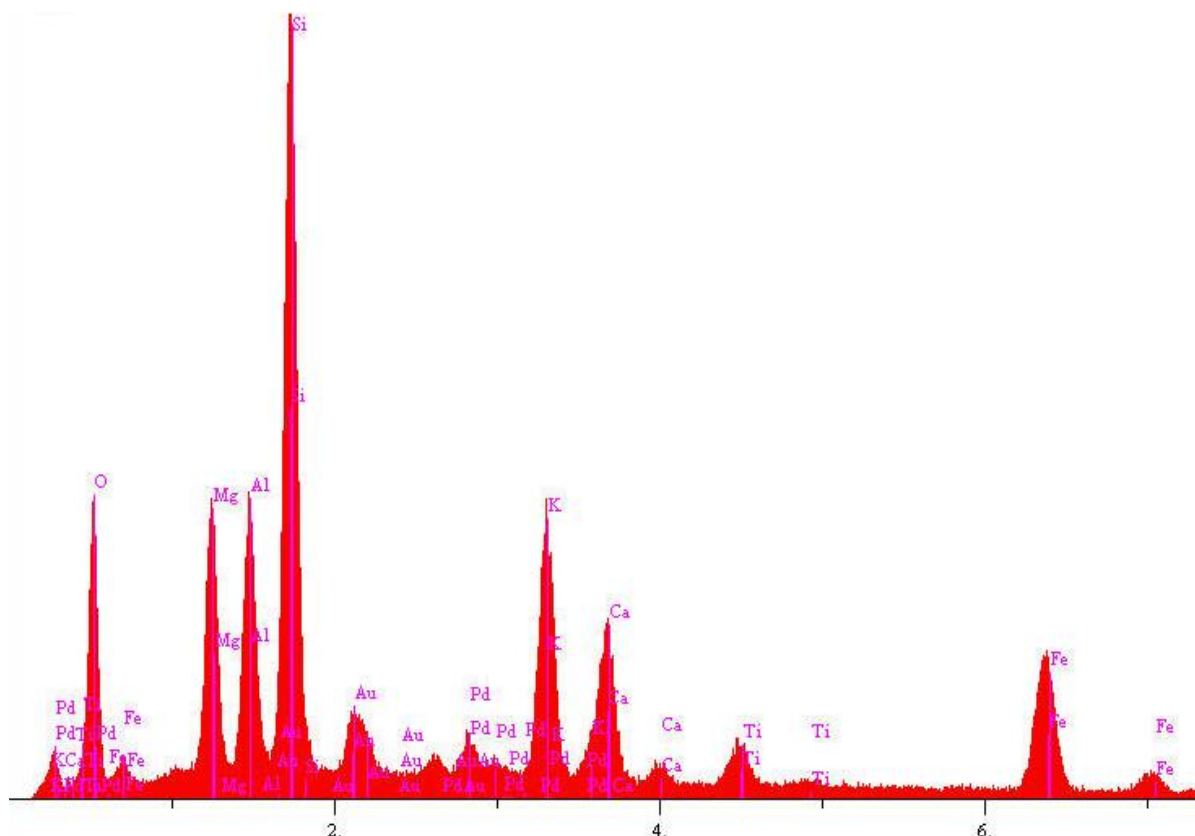
(b)

Fonte: Acervo Pessoal

Conforme a análise por EDS dos pontos 1 e 2 marcados, (figuras 4.21 e 4.22), a relação C/S ficou em torno de 0,19 e de 0,26, respectivamente, sendo a primeira a

mais baixa dentre as amostras, uma vez que o local analisado é uma região rica em C-S-H, resultado de detecção de grande presença de sílica.

Figura 4.21 – EDS do ponto 1, marcado em 4.20 (b), relativa à amostra de concreto S15



Cursor=7.995 keV 45 cnt ID =
Vert=3460 Window 0.005 - 40.955= 188358 cnt

El.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc
O	Ka	128.14	2960	47.257	28.273 wt.%
Mg	Ka	169.68	3.407	8.260	7.508 wt.%
Al	Ka	183.25	3.540	7.548	7.616 wt.%
Si	Ka	519.92	5.963	19.341	20.313 wt.%
K	Ka	219.82	3.877	6.166	9.015 wt.%
Ca	Ka	124.59	2.919	3.642	5.459 wt.%
Ti	Ka	44.79	1.750	1.285	2.300 wt.%
Fe	Ka	136.95	3.060	4.885	10.201 wt.%
Pd	La	23.71	1.273	0.762	3.033 wt.%
Au	La	6.89	0.687	0.853	6.284 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

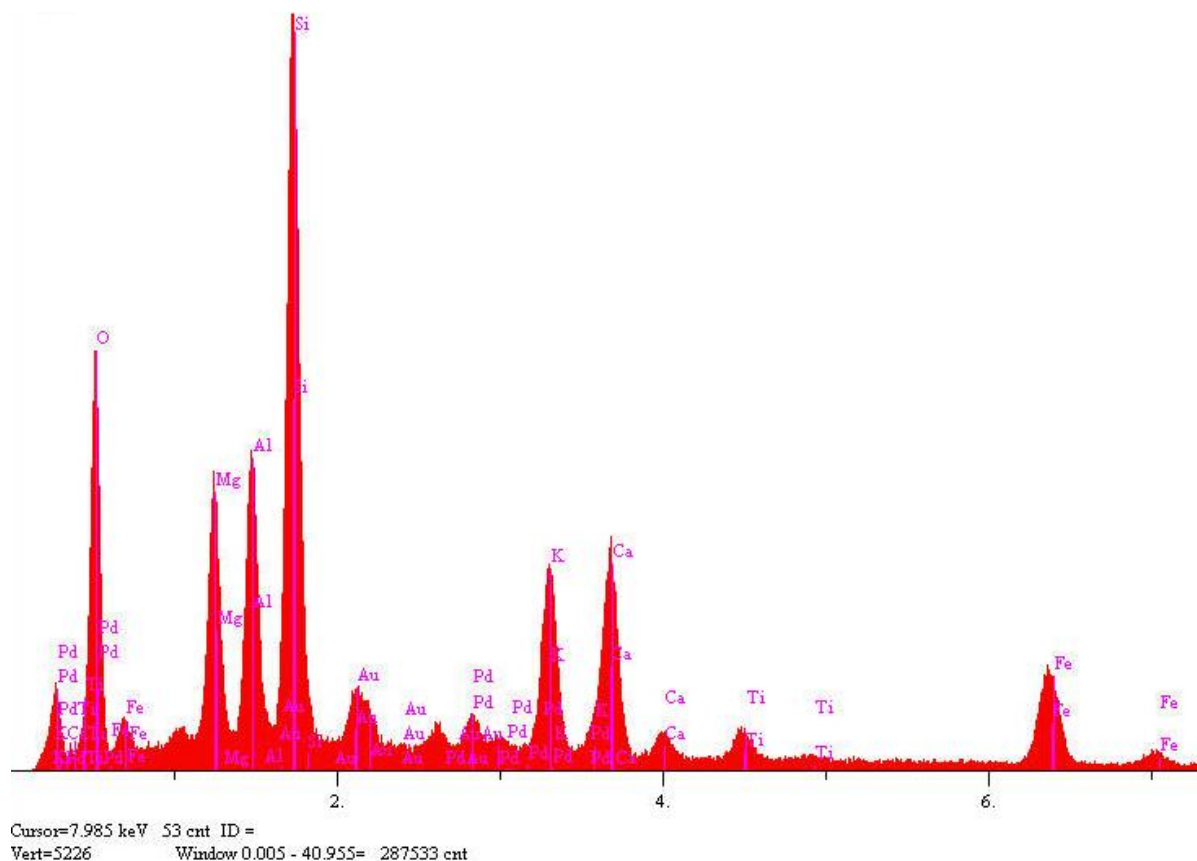
kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 58.5

$$C/S = 3,642 / 19,341 \approx 0,19$$

(Equação 19)

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4.22 – EDS do ponto 2, marcado em 4.20 (b), relativa à amostra de concreto S15



Elt.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc wt.%
O	Ka	161.06	2.538	55.058	35.469 wt.%
Mg	Ka	151.70	2.463	7.225	7.071 wt.%
Al	Ka	176.11	2.654	7.078	7.690 wt.%
Si	Ka	465.79	4.316	16.960	19.180 wt.%
K	Ka	143.53	2.396	3.946	6.213 wt.%
Ca	Ka	155.67	2.495	4.420	7.133 wt.%
Ti	Ka	27.37	1.046	0.775	1.493 wt.%
Fe	Ka	89.57	1.893	3.158	7.102 wt.%
Pd	La	19.70	0.888	0.626	2.684 wt.%
Au	La	6.13	0.495	0.752	5.966 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 100.0

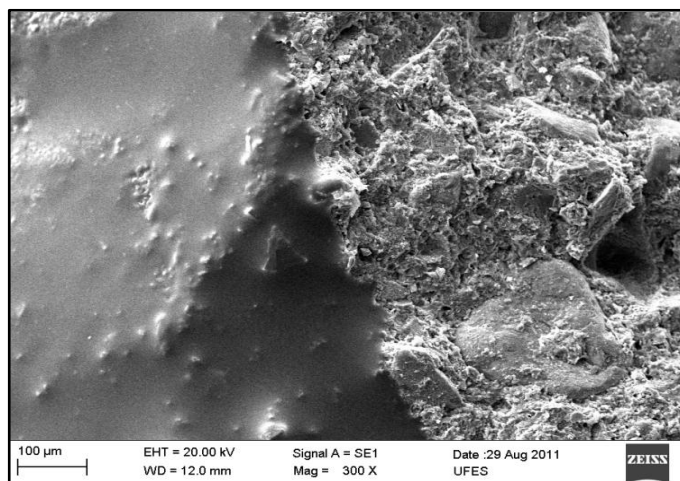
$$C/S = 4,420 / 16,960 \approx 0,26$$

(Equação 20)

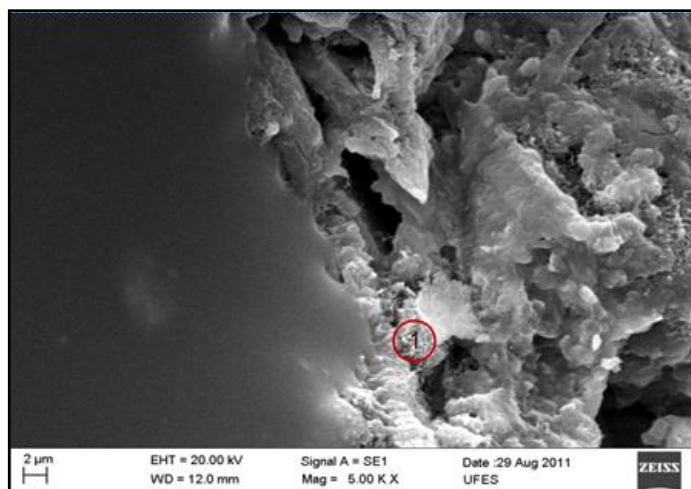
Fonte: Acervo Pessoal

Através das imagens obtidas pelo MEV para as amostras de concreto de traço S20, pode-se perceber (figura 4.23) acentuada formação de cristais, ainda que a matriz cimentícia do concreto apresente considerável porosidade se comparada aos traços analisados.

Figura 4.23 - Imagens obtidas por MEV do concreto de traço S20, ampliadas em 300 vezes (a) e em 5000 vezes (b), onde foi marcado o ponto 1, para análise de EDS



(a)



(b)

Fonte: Acervo Pessoal

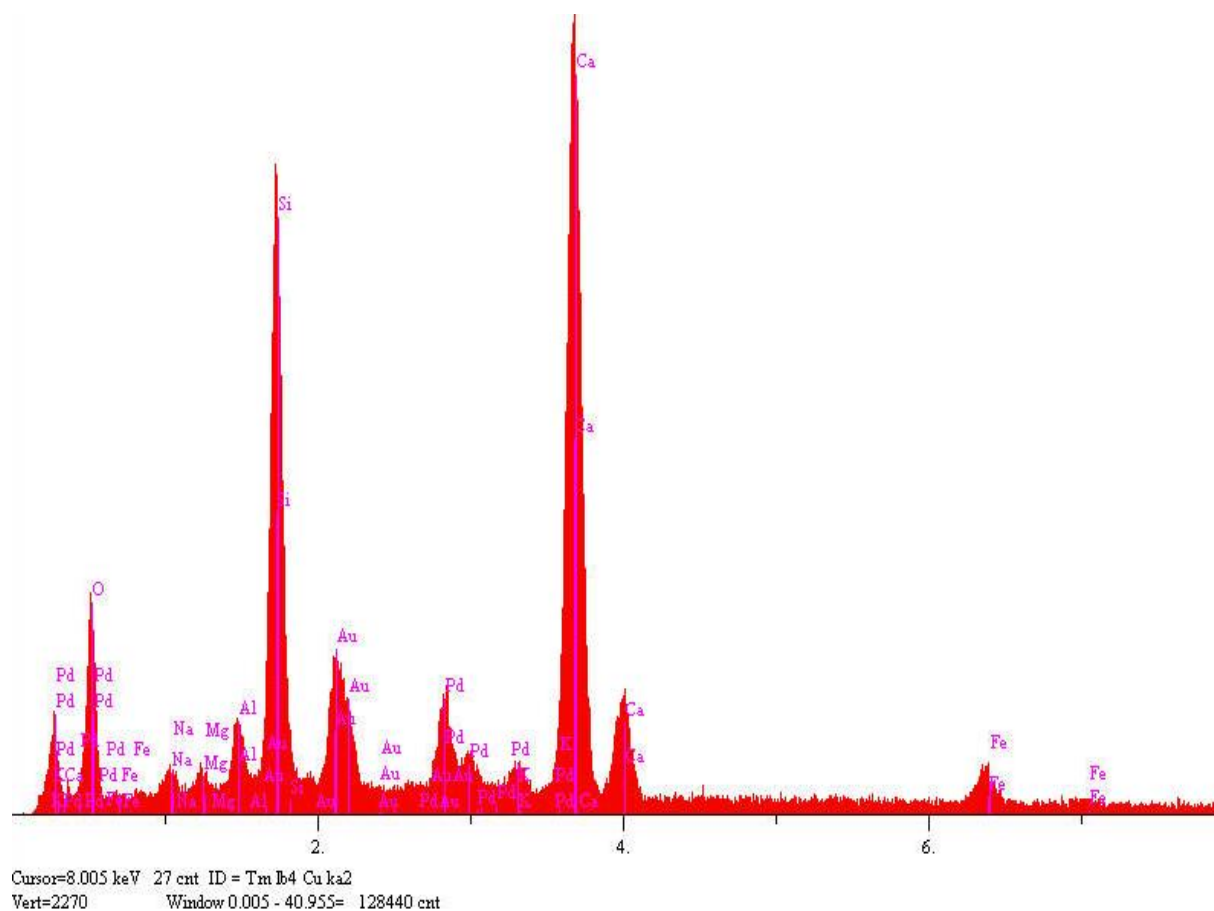
A análise de EDS do ponto 1, marcado na figura 4.23 (b) demonstrou uma relação C/S de aproximadamente 1,43 (figura 4.24).

A análise da microestrutura do concreto permitiu compreender alguns dos resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica e até mesmo na aparência dos concretos. A textura muito fina do resíduo promoveu o preenchimento dos poros e boa interface com o agregado, provavelmente pela formação de cristais que auxiliam nesta ligação, mais em alguns traços de concreto que em outros.

Como esperado, a incorporação dos resíduos no concreto possibilitou o fechamento da microestrutura do concreto entre a pasta e o agregado, comprovando o bom

desempenho do concreto frente à resistência mecânica à tração, como pode ser afirmado no item 4.3.2.

Figura 4.24 – Análise de EDS do ponto 1, marcado em 4.23 (b), relativa à amostra de concreto S20



El.	Line	Intensity (c/s)	Error 2-sig	Atomic %	Conc
O	Ka	46.62	1.779	47.097	23.750 wt.%
Na	Ka	9.84	0.817	1.466	1.062 wt.%
Mg	Ka	6.65	0.672	0.664	0.509 wt.%
Al	Ka	27.41	1.364	2.097	1.783 wt.%
Si	Ka	261.75	4.215	17.069	15.110 wt.%
K	Ka	11.86	0.897	0.640	0.789 wt.%
Ca	Ka	425.47	5.374	24.440	30.872 wt.%
Ti	Ka	2.70	0.428	0.164	0.247 wt.%
Fe	Ka	22.09	1.225	1.557	2.741 wt.%
Pd	La	43.81	1.725	2.349	7.878 wt.%
Au	La	10.44	0.842	2.458	15.260 wt.%
				100.000	100.000 wt.%

kV 20.0
Takeoff Angle 35.0°
Elapsed Livetime 58.9

C/S = 24.440 / 17,069 ≈ 1,43

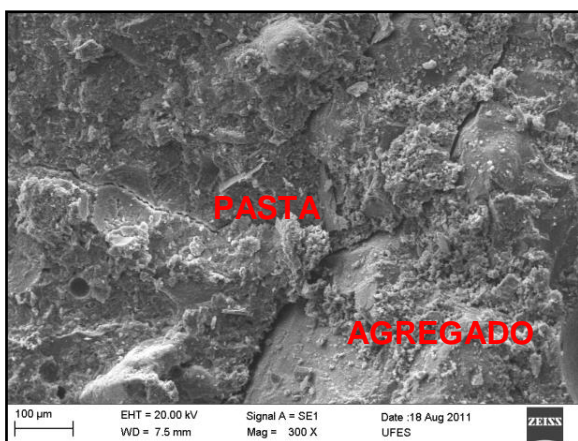
(Equação 21)

Fonte: Acervo Pessoal

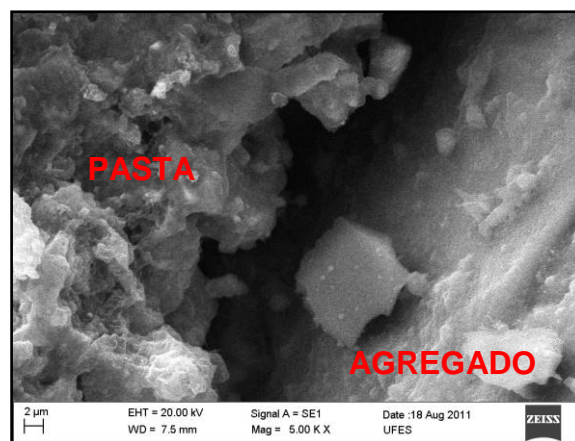
Segundo Silveira (2007), os valores encontrados na literatura para a relação C/S para a formação do C-S-H variam entre 1,5 e 2,0. Sendo assim, quanto maior a relação C/S, mais semelhante ao C-S-H (ou de um gel não expansivo) é o produto formado. Hasparyk (1999) também afirma que quanto menor a relação C/S maiores as expansões resultantes evidenciando a formação de gel expansivo. À medida que a relação C/S aumenta, são observadas expansões reduzidas e gel de composição semelhante ao C-S-H.

Tanto os concretos quanto as pastas não apresentaram qualquer tipo de fissuração que denotasse a formação de um gel de características excessivamente expansivas ou que caracterizasse reação álcali-sílica deletéria.

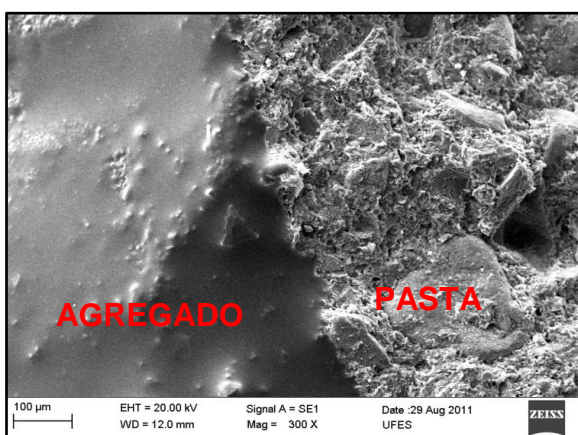
Figura 4.25 - Imagens obtidas por MEV dos concretos de traço REF e S20, ampliadas em 300 vezes (a) e (c) e em 5000 vezes (b) e (d), enfatizando o efeito da incorporação do resíduo no preenchimento das zonas de transição dos concretos.



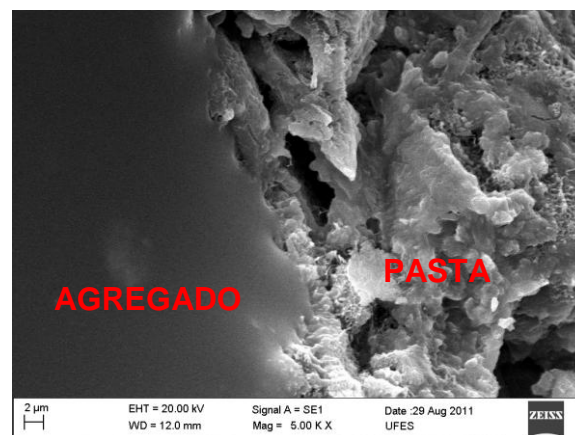
(a) concreto REF



(b) concreto REF



(c) concreto S20



(d) concreto S20

Fonte: Acervo Pessoal

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que, no material compósito, a zona de transição funciona como uma ponte entre a matriz cimentícia e o agregado graúdo, e que, por isso, a microestrutura da zona de transição na interface, especialmente o volume de vazios e microfissuras presentes, exerce grande influência na rigidez ou no módulo de elasticidade do concreto.

Observando-se a figura 4.25, é possível comparar o efeito da incorporação do resíduo nos concretos referência e S20 e confirmar o fechamento das zonas de transição e a formação de cristais de hidróxido de cálcio em quantidade suficiente para proporcionar melhorias nas propriedades mecânicas de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dos concretos, conforme observado nos itens 4.3.2 e 4.3.3 deste estudo.

Capítulo 5

Conclusões e Considerações Finais

5. Conclusões e Considerações Finais

No capítulo anterior, foram apresentados, discutidos e estatisticamente analisados os resultados dos ensaios realizados com as pastas cimentícias e com os concretos nos estados fresco e endurecido, cada um contendo os diferentes teores de substituição propostos para este estudo.

Amostras foram coletadas de corpos de prova remanescentes de ensaios anteriores e foram microestruturalmente analisadas, a fim de reconhecer se o resíduo promoveu o preenchimento de vazios, reações deletérias ou reações de ligação sólido-sólido que incrementassem a resistência dos concretos experimentados, reduzindo, assim, simultaneamente, a quantidade de cimento necessária para a produção de concretos e a deposição de resíduos de difícil decomposição no meio ambiente.

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões a que os resultados e suas análises permitiram chegar, além de sugestões para estudos futuros nesta mesma linha de pesquisas.

5.1 Conclusão geral

Este estudo avaliou o potencial de utilização do resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes de uma indústria beneficiadora de vidros, mais precisamente do processo de lapidação de vidros sodo-cálcicos, como substituto parcial do cimento Portland CPV ARI RS em concretos com finalidade estrutural de resistência mínima de 30 MPa.

A substituição do cimento pelo resíduo de ETE não surtiu efeitos positivos excepcionais nos concretos, mas também não houve reações deletérias e nem perda significativa das propriedades físicas e mecânicas em relação ao traço referência, na maioria dos casos.

Concluiu-se que é possível aplicar o resíduo neste âmbito, contanto que seja feito um controle sobre os teores utilizados. A aplicação de concretos produzidos com este resíduo em canteiros de obra seria viável apenas com a inserção de aditivos que retardassem sua pega.

5.2 Conclusões específicas

5.2.1 Conclusões relativas às pastas cimentícias

Nas pastas estudadas, foi perceptível a redução do tempo de pega das misturas na medida em que o resíduo foi acrescentado em maiores teores. A trabalhabilidade não chegou a ser comprometida, mas uma maior velocidade de moldagem e preparação das agulhas precisou ser impressa ao processo, principalmente nas pastas com maiores teores de resíduo. As pastas com 5% de substituição apresentaram expansibilidade dentro dos limites estabelecidos pela norma. No entanto, as pastas com 10, 15 e 20% de substituição não apresentaram expansão e, pelo contrário, retraíram ao final do ensaio de determinação de expansibilidade pelo

método de Le Chatelier. O aumento da absorção de água diretamente proporcional à quantidade de resíduo utilizada pode explicar este fato, visto que a tensão superficial da água envoltória dos componentes mais finos, que dificultam o movimento de ascensão da água, promove a aproximação das partículas. A maior quantidade de água absorvida pela pasta faz com que a influência da tensão superficial da água presente ao redor das partículas no interior da pasta seja maior.

No entanto, isto não seria suficiente para promover a retração das pastas em condições ambientes normais. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que a água quimicamente combinada, que integra parte da microestrutura de vários produtos de hidratação do cimento, não se perde na secagem, mas é liberada quando os hidratos se decompõem por aquecimento.

Supõe-se que o tempo de pega diminua na medida em que o teor de substituição do cimento pelo resíduo aumentar. Tal suposição pode ser feita com base nos resultados obtidos posteriormente nos ensaios de exsudação de água dos concretos em estado fresco.

5.2.2 Conclusões relativas aos concretos em estado fresco

Durante o processo de moldagem dos corpos de prova dos diferentes traços de concreto, percebeu-se a ocorrência proporcionalmente inversa da redução da trabalhabilidade em função da quantidade de resíduo presente nos traços. Ainda assim, esta propriedade não reduziu suficientemente a ponto de impossibilitar o manuseio das misturas. Entretanto, para que realmente não houvesse prejuízos ao experimento, o tempo para a preparação dos corpos de prova precisou ser reduzido e otimizado. A redução da trabalhabilidade pode ser explicada pela baixa granulometria e alto índice de absorção de água do resíduo.

Também a consistência apresentou reduções sucessivas ao acréscimo de maiores teores de resíduo aos concretos produzidos. Entretanto, todos os traços apresentaram-se coesos e homogêneos ao final dos ensaios para determinação de consistência pelo abatimento de tronco cone. Apesar disso, os traços S15 e S20,

não atenderam à faixa de consistência proposta neste trabalho e nem à NBR NM 67 (ABNT, 1998).

O aumento dos teores de resíduo nos concretos provocou redução também na quantidade de água de exsudação, o que pode ser explicado não apenas pela finura do resíduo, mas também pela massa específica muito próxima à do cimento, o que favorece a retenção de água no interior do concreto, em função do aumento do volume de finos, aumentando a resistência para a ascensão da água à superfície, reduzindo a segregação do concreto e o acúmulo de água retida sob agregados graúdos.

Apenas o teor de ar incorporado dos traços com diferentes percentuais de substituição não apresentou variações extraordinárias. Todos os traços foram considerados normais, pois atenderam aos limites determinados pela NBR NM 47 (ABNT, 2002), inclusive o traço S20, que, em números absolutos, apresentou o maior teor de ar incorporado, mantendo-se, no entanto, muito próximo do traço S5 neste aspecto, em que ambos se distanciaram mais do que os outros traços do concreto referência, que apresentou o menor teor de ar incorporado.

Quando avaliados em estado fresco, as substituições aparentemente não surtiram efeitos, a não ser pela necessidade de maior quantidade de água quando utilizados maiores teores de resíduo, sendo, portanto, perceptível o aumento da consistência dos concretos, como dito anteriormente. Ainda que não tenha sido acrescida água de amassamento, pois a relação a/c e a/ag foram mantidas constantes justamente para avaliação das propriedades relativas à consistência e trabalhabilidade dos concretos, sua aplicação não foi prejudicada. No entanto, devido à velocidade com que o concreto com maiores teores de resíduo cessa a exsudação e endurece, sua utilização efetiva em canteiros de obras exigiria o acréscimo de aditivos químicos, podendo retardar a secagem em tempo suficiente para a moldagem de fôrmas sem maiores complicações.

5.2.3 Conclusões relativas aos concretos em estado endurecido

Analisando o difratograma de raios X realizado percebe-se que o resíduo estudado possui características muito semelhantes ao vidro sodo-cálcico puro, sendo, portanto, amorfo, o que traria bons resultados relativos ao desempenho se misturado ao concreto.

Dal Molin (2005) afirma que dosagens corretas de adições minerais com teores significativos de sílica amorfa, associados a fatores como a dosagem do concreto e as condições de cura, podem surtir efeitos físicos e químicos benéficos à resistência dos concretos, em função do processo de refinamento dos poros e dos cristais presentes na matriz cimentícia do concreto (através da reação pozolânica), aumentando a influência da zona de transição, influenciando positivamente na resistência final.

Quanto às propriedades mecânicas dos corpos de prova testados, houve diferença nos resultados concernentes à resistência entre as misturas com diferentes teores de substituição.

Para os ensaios de resistência à compressão axial, ao final da idade de 28 dias, os concretos com 15% de substituição obtiveram os melhores resultados dentre os concretos híbridos, apresentando os valores mais próximos aos do concreto referência e a menor variação entre os corpos de prova rompidos. Estatisticamente, pertencem ao mesmo grupo dos concretos referência, juntamente aos concretos S10. Comprovou-se que o teor de substituição do cimento pelo resíduo de ETE é um fator significativo no que diz respeito à resistência à compressão axial.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade não demonstraram variação relevante aos 28 dias de idade em nenhum dos concretos, independentemente do teor de substituição do cimento pelo resíduo proveniente da estação de tratamento de efluentes da indústria beneficiadora de vidros planos sodo-cálcicos. Apesar de haver diferenças, ainda que pequenas, com relação aos números absolutos dos resultados, estatisticamente, os concretos não diferem significativamente em cada uma das propriedades isoladamente.

Analisando-se os dados estatísticos sem levar em conta o programa experimental, se poderia dizer que o fator de maior influência nas propriedades mecânicas testadas foi a idade dos concretos estudados, já que independentemente dos teores de substituição, todos tiveram a resistência melhorada na idade de 28 dias. Mehta e Monteiro (2008) afirmam que quando usadas como substituição parcial do cimento Portland, as adições minerais costumam ter um efeito retardador da resistência nas primeiras idades.

No entanto, a idade por si só não pode ser considerada como o fator de maior influência, visto que apenas sua interação com os teores de substituição proporcionou a variação das propriedades mecânicas dos concretos estudados. Por isso, considera-se o percentual de substituição do cimento Portland CPV ARI RS pelo resíduo de ETE como o fator de maior influência nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos.

A análise estatística permite concluir que nem todos os grupos são homogêneos, ainda que apresentadas pequenas diferenças no que tange aos resultados absolutos obtidos nos ensaios.

A análise da microestrutura dos concretos demonstrou que os concretos S15 tiveram sua porosidade matricial minimizada e as zonas de transição reforçadas por formações cristalinas recorrentes da reação química com o resíduo durante o processo de hidratação. Não apenas haveria um benefício em relação à resistência mecânica, mas também em relação à durabilidade, visto que a permeabilidade do concreto pode ser consideravelmente reduzida.

No caso do resíduo estudado, o preenchimento dos poros dos concretos foi notável, principalmente nos concretos com substituições de 15% do cimento pelo resíduo. Entretanto, seria necessário medir o índice de pozolanicidade do material para verificar se a reação pozolânica foi efetivamente influente nas propriedades mecânicas dos concretos estudados.

A norma NBR 8953 (ABNT, 2009) determina o uso de concretos de resistência mínima de 25 MPa para fins estruturais. Isto significa que os resultados obtidos neste estudo superaram as especificações mínimas de utilização de concretos com finalidade estrutural.

No entanto, para este estudo, estipulou-se o valor de resistência de 35 MPa, podendo-se afirmar, portanto, que apenas os concretos S15 atingiram o objetivo deste estudo em relação às propriedades mecânicas dos concretos estudados, embora as médias das resistências dos outros traços tenham se aproximado bastante.

5.3 Sugestões para futuros estudos

A realização deste trabalho incitou a percepção de lacunas de inviável cumprimento pleno em função do tempo disponível para a realização das pesquisas e de ensaios que permitissem aprofundamento de resultados, o que permite a sugestão de estudos mais aprofundados em torno da produção de concretos com a aplicação do resíduo proveniente de ETEs das indústrias beneficiadoras de vidros planos em diferentes teores de substituição ao cimento.

Dentre as sugestões aqui proferidas, está a aplicação do resíduo em maiores teores, buscando a dosagem ideal e até mesmo a introdução de aditivos para mitigar os efeitos da rápida secagem dos concretos produzidos, visando aplicá-lo na construção civil. Ainda que não possa até o presente momento ser aplicado em larga escala em função de sua produção restrita se comparada à demanda da construção civil atualmente, o empacotamento do resíduo representaria benefícios nos aspectos ambientais e financeiros, visto que é um resíduo que necessita de logística e custos para o transporte até seu destino final de deposição, também custeada pela indústria geradora do resíduo.

Em função da possibilidade de reatividade tardia do resíduo de ETE, ensaios que permeiem avaliar o incremento das propriedades físicas e mecânicas dos concretos estudados deveriam ser realizados após a idade de 28 dias, incluindo a investigação por procedência de análise microestrutural da influência de potenciais reações pozolânicas desencadeadas pelo resíduo utilizado e da possibilidade de ocorrência de reações álcalis-agregados. Estudos relacionados ao calor de hidratação e à energia de ativação, fator relacionado à sensibilidade térmica do concreto quanto à tendência de facilitar as reações de hidratação do cimento, possibilitando maior desenvolvimento da resistência do concreto.

Julga-se importante o estudo de parâmetros relacionados à durabilidade de concretos produzidos com este resíduo em diferentes teores, como a suscetibilidade à permeabilidade de cloretos, abordando inevitavelmente os aspectos relacionados à porosidade e ao refinamento dos poros, visto que são estes os mecanismos de ingresso de agentes deletérios para o interior dos concretos.

Referências

Referências Normativas e Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM C 1260** – Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) Philadelphia (2007).

_____ **ASTM C 618** – Standard Test Method for Fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete. Philadelphia (1991).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733** - Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____ **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2003.

_____ **NBR 5739**. Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____ **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 7215**. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

_____ **NBR 8522**. Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 8953**. Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Versão Corrigida 1:2011. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 9833**. Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____ **NBR 10004**. Resíduos Sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____ **NBR 11558**. Concreto - Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, 2008.

_____ **NBR 11582**. Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____ **NBR 12127**. Gesso para construção – Determinação das propriedades físicas do pó – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

_____**NBR 12826.** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1993.

_____**NBR 12989.** Concreto - Determinação da exsudação. Rio de Janeiro, 1993.

_____**NBR NM 14.** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR NM 15.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR NM 16.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR NM 18.** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2004.

_____**NBR NM 23** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____**NBR NM 33.** Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 1998.

_____**NBR NM 43.** Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2002.

_____**NBR NM 45.** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____**NBR NM 46.** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____**NBR NM 47.** Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco - Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.

_____**NBR NM 52.** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR NM 53.** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____**NBR NM 65.** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2002.

_____**NBR NM 67.** Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____**NBR NM 76.** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____**NBR NM 248.** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/index.php/24>>. Acesso em junho de 2010.

ARAÚJO, A. P.; PERUZZI, A. P.; DIAS, J. F.; SILVA, T. J. Verificação das atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 53, 2011, Florianópolis. **53º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2011.

ARRUDA, M.F.O.; PAMPLONA, H.C.; PAMPLONA, A.D.G. Reutilização de resíduo vítreo (pó de vidro tipo soda-cal) na fabricação de concreto: um estudo experimental. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL – PRÁTICAS RECOMENDADAS, 4., 2001, São Paulo. **Anais CT 206 Meio Ambiente**. São Paulo: IBRACON, 2001, p. 184.

BABU, K.G.; PRAKASH, P.V.S. Efficiency of silica fume on concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n.6, p. 1273-1283, Elsevier, 1995.

BARDINI, I. S.; MARCHIORO, T. B. **Um estudo exploratório do uso de vidro reciclado como agregado de concretos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2007.

BARROSO, L.B.; MOHAMAD, G.; LOPES, M.I.P.; MACIEL, A.V. Viabilidade tecnológica para o uso do vidro moído em argamassa e concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: IBRACON, 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002**. Disponível em www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=307&ano=&texto=>. Acesso em: 03 jun. 2010.

BYARS, E.A.; ZHU, H.Y.; MORALES, B. **ConGlassCrete I**, 2004, 59p. Centre for Cement and Concrete. Final Report. Universidade de Sheffield. Inglaterra, 2004.

CALMON, J. L. Resíduos industriais e agrícolas. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007, v. 2, p. 1590-1627.

CEMPRE. **Consórcio Empresarial para a Reciclagem**. Disponível em www.cempre.org.br. Acessado em junho de 2010.

CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENERO, A. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, v. 25, p. 197-201.2005.

COSTA E SILVA, A. J. ; BARBOSA, F. R.; MOTA, J. M. F.; CARVALHO, J. R. Utilização de vidro reciclado para produção de concreto verde em Fernando de Noronha. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS. 6, 2011, Vitória - ES. **IV Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, 2011.

DAL MOLIN, D.C.C.; VIEIRA, F.P.; KULAKOWSKI, M. P.; VILELA, A.C.F. Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssílica. CPGEC/UFRGS. 2007.

DAL MOLIN, D.C.C., Adições minerais para concreto estrutural. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: ensino, pesquisas e realizações..** 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005, v. 1, p. 345-379.

DAL MOLIN, D.C.C., Adições minerais. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia..** 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2011, v. 1, p. 261-309.

GRANDE, L. R. V.; FORMAGINI S.; RIVA, G. S. Dosagem e caracterização de concretos com incorporação de vidro triturado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 51, 2009, Curitiba. **51º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2009.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali - agregado – efeito da cinza de casca de arroz e sílica ativa**. Dissertação (Mestrado). Curso de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiânia. Goiânia, GO, 1999, 257p.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 1309-1312, 2010.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Use of waste glass in cement-based materials. Universidade de Toulouse. 200?.

ISMAIL, Z.Z.; AL-HASHMI E.A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v. 24, p.655-659, 2009.

KOLLER, D.R.P.; PILECCO, D.S.; BOHRER, D.; DE GODOY, J.; FENSTERSEIFER, C.A.J.; BARROSO, L.B. Avaliação da resistência à compressão de argamassas produzidas com vidro moído. **Disc. Scientia**. Série: Ciências naturais e Tecnológicas, Santa Maria, n.1, v.8, p.17-23, 2007.

KOU, S.C.; POON, C.S. Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. **Cement and Concrete Composites**, Vol. 31(9), pp. 622-627, 2009.

LOPÉZ, D.A.R.; AZEVEDO, C.A.P. Avaliação da utilização de vidro cominuído como material agregado ao concreto. XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Santa Catarina, 2003.

LOPÉZ, D.A.R.; AZEVEDO, C.A.P.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v.51, pp.318 -324, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO. Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEYER, C., AND XI, Y. Use of Recycled Glass and Fly Ash for Precast Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.11, n.2. pp 89-90, 1999.

OLIVEIRA, M. S.; SILVA, M. A.; BAIA, M. V.; PAIVA, O. A.; LIMA, S. P. B.; VASCONCELOS, R. P. Aplicação de resíduo de vidro temperado como agregado graúdo em matriz cimentícia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo : IBRACON, 2010. v. 1. p. 1-14.

PAIVA, O.A.; CORDEIRO, G.C.; ROCHA, F.S.; LIMA, S.P.B.; VASCONCELOS, R.P.; FILHO, R.D.T. Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

PARK, S.B.; LEE, C.B.; KIM, J.H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 2181-2189, 2004.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A.P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2011, v. 1, p. 585-614.

PEREIRA NETO, P.M.; FONSECA, R.L.M.; DJANIKIAN, J.G. A influência de um inibidor à base de nitrito de cálcio sobre algumas características do concreto de alta resistência com microssilica. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF HIGH-PERFORMANCE OF CONCRETE AND PERFORMANCE AND QUALITY OF CONCRETE STRUCTURES. **Proceedings**. Florianópolis, PINI, 1996, p. 566-577.

PINTO, J.L.A.; MASUERO, A.B.; HASPARYK, N.P. Aproveitamento de resíduo de vidro em compósitos de cimento e a preservação do meio ambiente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 50, 2008, Salvador. **50º Congresso**

Brasileiro do Concreto. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

RIBEIRO, J. L. D.; CATEN, C. T., **Projetos de Experimentos.** Porto Alegre: UFRGS, 2010.

SALOMÃO, M.C.F.; DIAS, J.F.; MARTINS, J.A.L.G.; SILVA, T.J. Estudo sobre utilização de vidro em argamassas cimentícias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 52, 2010, Fortaleza. **52º Congresso Brasileiro do Concreto.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2010.

SANTOS, A.R. **Ficha técnica de iniciação de pesquisa.** Escola Politécnica da USP. Departamento de Construção Civil. São Paulo, 2009. 5p.

SCHWARZ, N.; NEITHALAH, N. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 429-436, 2008.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 91-100, 2000.

SHAYAN, A.; XU, A. Value-added utilization of waste glass in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 81-89. 2004.

SHI, Y. X.; MATSUI, I., GUO, Y.J. A study on the effect of fine mineral powders with distinct vitreous contents on the fluidity and rheological properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1381-1387. 2004.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 987-993, 2005.

SHI, C.; ZHENG K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, p. 234-247, 2007.

SILVA, T. J.; DIAS, J. F; Agopyan, V. Proposta de procedimento para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para emprego em concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47, 2005, Olinda/Recife. **47º Congresso Brasileiro do Concreto.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. v. V. p. 1088-1097.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação álcali-agregado.** Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

STATSOFT,INC. Programa computacional *Statistica 7.0*. E.A.U. 2004

TERRO, M. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. **Building and Environment**, v. 41, p. 633-639, 2006.

TOPÇU, I.B.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 267-274, 2004.

Apêndices

*Resultados Individuais dos Ensaios em Pastas
Cimentícias e em Concretos Endurecidos*

*APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios
realizados com as pastas cimentícias*

APÊNDICE A

A. RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM AS PASTAS CIMENTÍCIAS

Com as pastas cimentícias foram realizados ensaios de expansibilidade Le Chatelier, no intuito de conhecer a influência neste aspecto e de tempo de pega. Porém, apenas os ensaios de expansibilidade pelo método das agulhas de Le Chatelier gerou resultados apresentáveis na forma de tabelas.

A.1 Determinação de expansibilidade Le Chatelier

As tabelas A.1.1 a A.1.5 apresentam os resultados individuais das agulhas de Le Chatelier, moldadas com as diferentes misturas de pastas, ensaiadas para determinação da expansibilidade em cura à quente, para corpos de prova cilíndricos, de 30 mm de altura e igual diâmetro.

Tabela A.1.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação da expansibilidade Le Chatelier das pastas cimentícias de traço REF

PASTA CIMENTÍCIA REFERÊNCIA				
	CP 01	CP 02	CP 03	Expansibilidade média (mm)
Expansibilidade Inicial (mm)	2	0,9	2,8	1,9
Expansibilidade após 3hs de ebulição (mm)	1,9	0,9	2,1	1,6
Expansibilidade após 5hs de ebulição (mm)	1,5	0,5	2	1,3
Expansibilidade após 7hs de ebulição (mm)	1,5	0,5	3	1,7
Expansibilidade após 9hs de ebulição (mm)	1,5	0,5	3	1,7
Expansibilidade final (mm)	-0,5	-0,4	2	2,3
			RESULTADO FINAL	0,4

Nota: Norma adotada

* NBR 11582 (ABNT, 1991) – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados com as pastas cimentícias

Tabela A.1.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação da expansibilidade Le Chatelier, das pastas cimentícias de traço S5

PASTA CIMENTÍCIA S5				
	CP 01	CP 02	CP 03	Expansibilidade média (mm)
Expansibilidade Inicial (mm)	0,7	3	2,8	2,16
Expansibilidade após 3hs de ebulição (mm)	0,4	2,5	2,1	1,7
Expansibilidade após 5hs de ebulição (mm)	0,5	3,0	2	1,8
Expansibilidade após 7hs de ebulição (mm)	0,9	2,9	3	2,3
Expansibilidade após 9hs de ebulição (mm)	0,9	3,1	3	2,3
Expansibilidade final (mm)	0,2	0,1	2	2,3
			RESULTADO FINAL	0,14

Nota: Norma adotada

* NBR 11582 (ABNT, 1991) – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela A.1.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação da expansibilidade Le Chatelier, das pastas cimentícias de traço S10

PASTA CIMENTÍCIA S10				
	CP 01	CP 02	CP 03	Expansibilidade média (mm)
Expansibilidade Inicial (mm)	1,7	1,8	3	2,16
Expansibilidade após 3hs de ebulição (mm)	2,9	1,8	3,1	2,6
Expansibilidade após 5hs de ebulição (mm)	1,5	1,2	3,1	1,9
Expansibilidade após 7hs de ebulição (mm)	1,5	1,1	3,1	1,9
Expansibilidade final (mm)	0	0,0	0,1	0
			RESULTADO FINAL	RETRAÇÃO

Nota: Norma adotada

* NBR 11582 (ABNT, 1991) – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados com as pastas cimentícias

Tabela A.1.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação da expansibilidade Le Chatelier das pastas cimentícias de traço S15

PASTA CIMENTÍCIA S15				
	CP 01	CP 02	CP 03	Expansibilidade média (mm)
Expansibilidade Inicial (mm)	0,4	3,3	3,3	2,3
Expansibilidade após 3hs de ebulição (mm)	0,3	3,0	3,1	2,0
Expansibilidade após 5hs de ebulição (mm)	0,5	3,0	3,0	2,2
Expansibilidade após 7hs de ebulição (mm)	0,5	3,0	3,0	2,2
Expansibilidade final (mm)	0,1	0,0	0	0
			RESULTADO FINAL	RETRAÇÃO

Nota: Norma adotada

* NBR 11582 (ABNT, 1991) – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela A.1.5 - Resultados individuais dos ensaio para determinação da expansibilidade Le Chatelier, das pastas cimentícias de traço S20

PASTA CIMENTÍCIA S20				
	CP 01	CP 02	CP 03	Expansibilidade média (mm)
Expansibilidade Inicial (mm)	1,5	2,3	2,7	2,2
Expansibilidade após 3hs de ebulição (mm)	1,1	2,9	2,1	2,0
Expansibilidade após 5hs de ebulição (mm)	1,1	2,1	2,5	1,9
Expansibilidade após 7hs de ebulição (mm)	1,1	2,5	2,2	1,9
Expansibilidade após 9hs de ebulição (mm)	1,1	2,5	2,2	1,6
Expansibilidade final (mm)	0	0,2	0,5	0,2
			RESULTADO FINAL	RETRAÇÃO

Nota: Norma adotada

* NBR 11582 (ABNT, 1991) – Cimento Portland – Determinação da expansibilidade de Le Chatelier.

Fonte: Acervo Pessoal

*APÊNDICE B – Resultados individuais dos ensaios
realizados com os concretos endurecidos*

APÊNDICE B

B. RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS COM OS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

B.1 Determinação da resistência a compressão axial

Os resultados individuais dos corpos de prova cilíndricos moldados com as misturas de concreto ensaiados para determinação da resistência à compressão axial estão representados nas tabelas B.1.1 a B.1.5.

Tabela B.1.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto referência.

CONCRETO REFERÊNCIA							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
01	03	99,25	17800	A (cônica)	201	22,6	22,775
02	03	99,60	18000	A (cônica)	201	22,7	
03	03	100,00	17900	A (cônica)	202	22,4	
04	03	100,00	18700	A (cônica)	201	23,4	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
09	07	99,65	22900	A (cônica)	202	28,8	28,05
10	07	99,50	21500	A (cônica)	202	27,1	
11	07	99,00	22100	A (cônica)	202	27,9	
12	07	98,90	22200	A (cônica)	201	28,4	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
17	28	99,60	28400	A (cônica)	203	35,8	36,175
18	28	99,50	28300	A (cônica)	202	35,7	
19	28	99,45	29200	A (cônica)	200	36,9	
20	28	99,30	28600	A (cônica)	202	36,3	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

Tabela B.1.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S5

CONCRETO S5							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
01	03	100,00	17600	A (cônica)	200	22	21,95
02	03	99,70	16900	A (cônica)	200	21,2	
03	03	99,80	18000	A (cônica)	200	22,6	
04	03	99,67	17400	A (cônica)	200	22	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
09	07	99,80	20900	A (cônica)	202	26,2	26,4
10	07	99,60	21200	A (cônica)	200	26,7	
11	07	99,45	21700	A (cônica)	201	27,4	
12	07	99,60	20100	A (cônica)	203	25,3	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
17	28	99,85	27000	A (cônica)	203	33,9	33,95
18	28	99,85	28100	A (cônica)	201	35,2	
19	28	99,60	26400	A (cônica)	200	33,3	
20	28	99,80	26600	A (cônica)	202	33,4	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.1.3 - Resultados individuais dos ensaio para determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S10

CONCRETO S10							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
01	03	99,35	18700	A (cônica)	201	23,7	21,35
02	03	99,85	16500	A (cônica)	202	20,7	
03	03	99,65	16600	A (cônica)	199	20,9	
04	03	99,75	16600	A (cônica)	201	20,1	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
09	07	99,60	19000	A (cônica)	203	24	24,825
10	07	99,40	19200	A (cônica)	202	24,3	
11	07	100,10	19600	A (cônica)	203	24,5	
12	07	99,45	21000	A (cônica)	202	26,5	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
17	28	99,50	27800	A (cônica)	202	35,08	34,675
18	28	99,25	27300	A (cônica)	203	34,62	
19	28	99,40	26600	A (cônica)	203	33,7	
20	28	99,25	27800	A (cônica)	203	35,3	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

Tabela B.1.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S15

CONCRETO S15							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
01	03	99,95	16400	A (cônica)	201	20,5	20,875
02	03	99,05	16400	A (cônica)	203	21	
03	03	99,75	16700	A (cônica)	202	21	
04	03	99,65	16500	A (cônica)	201	21	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
09	07	99,50	19700	A (cônica)	202	25	25,35
10	07	100,00	21100	A (cônica)	201	26,4	
11	07	99,75	19900	A (cônica)	203	25	
12	07	99,55	19900	A (cônica)	202	25	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
17	28	99,50	27900	A (cônica)	202	35,2	35,2
18	28	99,45	27400	A (cônica)	201	34,7	
19	28	99,75	28000	A (cônica)	200	35,2	
20	28	99,40	28200	A (cônica)	204	35,7	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.1.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S20

CONCRETO S20							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
01	03	100,00	14800	A (cônica)	202	18,5	18,11
02	03	99,30	13600	A (cônica)	203	17,3	
03	03	99,50	14600	A (cônica)	202	18,5	
04	03	100,00	14500	A (cônica)	201	18,12	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
09	07	99,50	18400	A (cônica)	201	23,2	23,65
10	07	99,80	18800	A (cônica)	203	23,6	
11	07	99,95	19800	A (cônica)	201	24,8	
12	07	99,95	18300	A (cônica)	203	23	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
17	28	99,60	25300	A (cônica)	202	31,9	33,35
18	28	99,70	26700	A (cônica)	203	33,6	
19	28	99,70	27200	A (cônica)	201	34,2	
20	28	99,60	26700	A (cônica)	203	33,7	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

B.2 Determinação de resistência a tração por compressão diametral

Abaixo estão as planilhas com os resultados individuais dos corpos de prova cilíndricos moldados com as misturas de concreto, ensaiados para determinação da resistência à tração por compressão diametral.

Tabela B.2.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para corpos de prova cilíndricos* com traço de concreto referência

CONCRETO REFERÊNCIA							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
05	03	99,00	8500	A (cônica)	200	2,65	2,6475
06	03	100,50	8500	A (cônica)	201	2,62	
07	03	99,50	8300	A (cônica)	200	2,60	
08	03	99,25	8700	A (cônica)	201	2,72	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
13	07	99,55	9700	A (cônica)	200	3,04	2,995
14	07	99,65	8800	A (cônica)	201	2,74	
15	07	99,35	9700	A (cônica)	200	3,05	
16	07	99,55	10100	A (cônica)	201	3,15	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
21	28	99,55	12700	A (cônica)	200	4,00	3,635
22	28	99,65	11600	A (cônica)	201	3,61	
23	28	99,90	10200	A (cônica)	200	3,20	
24	28	99,60	11900	A (cônica)	200	3,73	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

Tabela B.2.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral para corpos de prova cilíndricos* com traço de concreto S5.

CONCRETO S5							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
05	03	99,47	7300	A (cônica)	200	2,3	2,4075
06	03	99,10	8500	A (cônica)	200	2,67	
07	03	99,80	8100	A (cônica)	200	2,54	
08	03	99,70	6800	A (cônica)	200	2,12	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
13	07	99,50	10700	A (cônica)	201	3,34	2,9125
14	07	99,80	7800	A (cônica)	200	2,44	
15	07	99,35	9700	A (cônica)	200	3,05	
16	07	99,60	9000	A (cônica)	200	2,82	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
21	28	99,55	10400	A (cônica)	201	3,24	3,53
22	28	99,25	10400	A (cônica)	201	3,27	
23	28	99,65	12100	A (cônica)	202	3,75	
24	28	99,60	12400	A (cônica)	201	3,86	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.2.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos* com traço de concreto S10

CONCRETO S10							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
05	03	99,75	6800	A (cônica)	200	2,13	2,2
06	03	99,85	7800	A (cônica)	202	2,41	
07	03	99,65	6200	A (cônica)	202	1,92	
08	03	99,65	7500	A (cônica)	201	2,34	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
13	07	99,25	10500	A (cônica)	205	3,22	3,0075
14	07	99,70	8800	A (cônica)	202	2,73	
15	07	100,00	10900	A (cônica)	201	3,38	
16	07	99,10	8600	A (cônica)	201	2,7	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
21	28	99,45	11600	A (cônica)	203	3,60	3,8075
22	28	99,10	12500	A (cônica)	202	3,9	
23	28	99,50	12400	A (cônica)	203	3,83	
24	28	99,50	12700	A (cônica)	204	3,9	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

Tabela B.2.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S15

CONCRETO S15							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
05	03	99,90	8700	A (cônica)	202	2,7	2,4425
06	03	99,50	6600	A (cônica)	201	2,06	
07	03	99,75	8400	A (cônica)	201	2,61	
08	03	99,65	7700	A (cônica)	202	2,4	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
13	07	99,50	9700	A (cônica)	201	3,03	3,0475
14	07	99,25	9500	A (cônica)	201	2,96	
15	07	99,95	10000	A (cônica)	201	3,10	
16	07	99,75	9900	A (cônica)	200	3,1	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
21	28	99,20	12500	A (cônica)	200	3,93	3,7375
22	28	98,90	11800	A (cônica)	200	3,72	
23	28	99,40	11400	A (cônica)	201	3,56	
24	28	99,50	12000	A (cônica)	201	3,74	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.2.5 - Resultados individuais dos ensaios para determinação da resistência à tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S20

CONCRETO S20							
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
05	03	99,25	7600	A (cônica)	200	2,4	2,40
06	03	99,75	8000	A (cônica)	200	2,5	
07	03	99,50	7800	A (cônica)	203	2,41	
08	03	99,75	7400	A (cônica)	203	2,28	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
13	07	99,90	8900	A (cônica)	200	2,78	2,7
14	07	99,50	8400	A (cônica)	201	2,62	
15	07	99,95	7900	A (cônica)	200	2,47	
16	07	99,45	9300	A (cônica)	201	2,9	
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga (kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (Mpa)	Resistência média (Mpa)
21	28	99,25	12200	A (cônica)	200	3,83	3,84
22	28	99,80	12000	A (cônica)	201	3,73	
23	28	99,55	12900	A (cônica)	202	4,00	
24	28	99,80	12200	A (cônica)	200	3,81	

Nota: Norma adotada

* NBR 5739 (ABNT, 2007) – Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

B.3 Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão

Nas tabelas B.3.1 a B.3.5 estão os resultados individuais dos corpos de prova cilíndricos moldados com as misturas de concreto, ensaiados para determinação do módulo estático de elasticidade.

Tabela B.3.1 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade à compressão em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço REF

CONCRETO REF					
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga Máxima (N)	Altura (mm)	Módulo Elástico Elasticidade (E _{ci}) Gpa
01	35	99,85	266133	100	29,44
02	35	99,35	290995,41	100	30,79
03	35	99,50	264207,03	100	30,55

Nota: Norma adotada

* NBR 8522 (ABNT, 2008) – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.3.2 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto s5

CONCRETO S5					
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga Máxima (N)	Altura (mm)	Módulo Elástico Elasticidade (E _{ci}) GPa
01	35	99,15	275937,88	200	30,75
02	35	99,50	239869,86	200	29,87
03	35	99,70	254051,95	200	29,36

Nota: Norma adotada

* NBR 8522 (ABNT, 2008) – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.3.3 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S10.

CONCRETO S10					
CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga Máxima (N)	Altura (mm)	Módulo Elástico Elasticidade (E _{ci}) GPa
01	38	100,00	277338,59	100	29,69
02	38	99,50	253526,69	100	30,20
03	38	100,00	187868,88	100	32,42

Nota: Norma adotada

* NBR 8522 (ABNT, 2008) – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Fonte: Acervo Pessoal

APÊNDICE B – Resultados dos ensaios realizados com os concretos endurecidos

Tabela B.3.4 - Resultados individuais dos ensaios para determinação do módulo estático de elasticidade em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S15.

CONCRETO S15

CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga Máxima (N)	Altura (mm)	Módulo Elástico Elasticidade (Eci) GPa
01	30	99,75	245122,48	200	32,83
02	30	99,80	268234,03	200	29,37
03	30	99,95	267008,44	200	32,76

Nota: Norma adotada

* NBR 8522 (ABNT, 2008) – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Fonte: Acervo Pessoal

Tabela B.3.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo estático de elasticidade em corpos de prova cilíndricos*, moldados com traço de concreto S20

CONCRETO S20

CP	Idade de ruptura (dias)	Diâmetro médio (mm)	Carga Máxima (N)	Altura (mm)	Módulo Elástico Elasticidade (Eci) GPa
01	31	100,00	258604,23	200	30,91
02	31	100,00	274887,38	200	32,68
03	31	100,00	254577,22	200	32,07

Nota: Norma adotada

* NBR 8522 (ABNT, 2008) – Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.

Fonte: Acervo Pessoal

