

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de
concreto**

Lorena Jordoni Simões

VITÓRIA-ES

2013

LORENA JORDONI SIMÕES

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO LAMINADO NA PRODUÇÃO
DE CONCRETO**

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-ES

2013

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

Simões, Lorena Jordoni, 1985-

S593e Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de
concreto / Lorena Jordoni Simões. – 2013.
142 f. : il.

Orientador: Fernando Avancini Tristão.

Coorientador: Geilma Lima Vieira.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Resíduos como material de construção. 2. Resíduos de vidro –
Reaproveitamento. 3. Concreto. 4. Atividade pozolânica. I. Tristão,
Fernando Avancini. II. Vieira, Geilma Lima. III. Universidade Federal
do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 624

LORENA JORDONI SIMÕES

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO LAMINADO NA PRODUÇÃO
DE CONCRETO**

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, 18 de Dezembro de 2013.

Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Orientador

Prof. Dra. Geilma Lima Vieira
Universidade Federal do Espírito Santo
Professor Co-orientador

Prof. Dra. Sayonara Maria de Moraes Pinheiro
Universidade Federal do Espírito Santo
Membro da banca examinadora

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

Ao grande amor da minha vida Wesley que em todos os momentos me incentivou e sonhou comigo essa vitória. A minha mãe que sempre me orientou e me fez alcançar os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela vida e por ter me dado essa oportunidade de cursar o mestrado. Agradeço por sua graça, amor e a toda sabedoria que me foi concedida.

Agradeço ao professor e orientador Fernando Avancini Tristão pela dedicação, ensinamentos e por sempre ter me apoiado incondicionalmente. Seu exemplo de vida impulsiona a todos que estão ao redor, é impossível não mergulhar ao fundo na pesquisa ao lado de um professor como este. Agradeço sinceramente pela paciência e carinho durante essa caminhada que só consegui concluir graças a sua ajuda.

A professora e co-orientadora, Geilma, que com muito carinho e paciência me auxiliou nessa pesquisa. Ao professor João Luiz Calmon Nogueira da Gama que além de seus grandes conhecimentos técnicos sempre acrescentava com ensinamentos de vida, agradeço pelo grande apoio nesses anos que me acompanhou e me motivou.

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.

Agradeço 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, Xuxa e Sônia pela dedicação e boa vontade, sem os quais também seria impossível realizar tantas tarefas e tantos ensaios.

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 empresa Holcim pela colaboração na pesquisa, fornecendo os sacos de cimento necessários para os experimentos.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pela estrutura disponibilizada.

A todos os meus amigos de mestrado que foram excelentes “bons companheiros”, em especial a Aline Sauer, Aline Pignaton, Andreia, Poline e Rubi que sempre me incentivaram e me ajudaram nos momentos que precisava.

Aos meus amigos e familiares que foram pacientes com minha ausência, pois precisava me dedicar à pesquisa. O apoio de vocês foi essencial para me dar forças nos momentos mais difíceis.

Ao meu pai, que mesmo não estando fisicamente presente, sei que se alegraria grandemente com essa conquista.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, participaram desse grande desafio que é o mestrado.

Lorena Jordoni Simões

*“O temor do Senhor é o princípio da
sabedoria, bom entendimento têm todos os
que lhe obedecem, o seu louvor permanece
para sempre.”*

Salmos 111.10

RESUMO

JORDONI, L. S. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concretos**. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

O assunto sustentabilidade tem sido foco de diversas pesquisas e tem sido um dos principais motivos para indústria da construção civil reduzir os impactos ambientais e o alto consumo dos recursos naturais. A construção civil tem desenvolvido projetos com o intuito de melhorar a sustentabilidade através do aumento da reutilização de resíduos em materiais de construção. Muitos estudos já avaliaram a utilização do resíduo de vidro na produção de cimentos, argamassas, concretos e outros materiais. Porém, quando o mesmo é utilizado na forma de pó (granulometria fina) o mesmo apresenta alto índice de atividade pozolânica o que faz com que as propriedades da matriz cimentícia sejam melhoradas. Essa pesquisa teve como objetivo avaliar a potencialidade do uso do resíduo de vidro laminado proveniente dos vidros de parabrisas de automóveis como substituto parcial do cimento, enfocando as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição. As proporções de substituições em massa estabelecidas foram de 0, 5, 10 e 15% para todos os ensaios compreendidos nesse estudo. Para o concreto no estado fresco, foram realizados os ensaios de consistência e massa específica. No estado endurecido, os concretos foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram uma redução nos resultados de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral à medida que os teores de substituição aumentavam e o consumo de cimento diminuía. Os resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de elasticidade para os concretos com resíduo não apresentaram diferenças significativas quando comparados com os resultados do concreto de referência. A análise microestrutural permitiu verificar a formação de C-S-H em função das reações pozolânicas e a diminuição dos poros em idades mais avançadas.

Palavras-chave: Resíduo, vidro laminado, concreto, polivinilbutiral e atividade pozolânica.

ABSTRACT

JORDONI, L. S. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concretos**. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

The sustainability issue has been the focus several researches and has been a major reason for the construction industry to reduce environmental impacts and consumption of natural resources. The construction industry has developed projects aiming to improve sustainability by increasing the reuse of waste building materials. Many studies have evaluated the use of glass waste in the production of cements, mortars, concretes and other materials. However, when it is used in powder form (fine particle size) it presents high rate of pozzolanic activity which causes the cementitious matrix properties are improved. This study aimed to evaluate the potential use of the residue from the laminated glass windshield car glass as a partial substitute for cement, focusing on the mechanical properties of concrete made with different percentages of replacement. The proportions by mass of substitutions were set at 0, 5, 10 and 15 % for all assays included in this study. For concrete in the fresh state, assays were performed consistency and density. In the cured state, the concretes were subjected to the tests of compressive strength, tensile strength compression strength, modulus of elasticity and scanning electron microscopy. The results showed a decrease in the results of compressive strength and tensile strength by diametrical compression as the replacement levels increased and decreased consumption of cement. The results obtained in the test for determining the modulus of elasticity for concrete residue showed no significant differences when compared with the results of the reference concrete. Microstructural analysis demonstrated the formation of C-S-H due to the pozzolanic reactions and decreased pore at older ages.

Keywords: Waste, laminated glass, concrete, polyvinyl butyral and pozzolanic activity.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA	23
1.2	OBJETIVO	28
1.2.1	Objetivo geral	28
1.2.2	Objetivos específicos	28
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1	VIDRO.....	32
2.2	PANORAMA DO MERCADO NACIONAL DE VIDRO	37
2.3	NORMAS APLICÁVEIS AO VIDRO.....	38
2.4	A RECICLAGEM DO VIDRO.....	39
2.4.1	Processo de obtenção do resíduo de vidro laminado.....	40
2.4.2	Incorporação do resíduo de vidro laminado na produção de embalagens	43
2.5	ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	45
2.5.1	Estudos realizados com o aproveitamento em argamassas	48
2.5.2	Estudos realizados com o aproveitamento na produção de concretos.....	54
2.5.2.1	<i>Propriedades no estado fresco</i>	55
2.5.2.2	<i>Propriedades no estado endurecido</i>	57
2.5.3	Estudos realizados com o aproveitamento em outros materiais	65
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1	VARIÁVEIS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.2	MATERIAIS	73
3.2.1	Agregado miúdo	73
3.2.2	Agregado graúdo	74
3.2.3	Cimento	75
3.2.4	Resíduo de vidro laminado	77
3.3	PREPARAÇÃO DAS MISTURAS E ENSAIOS	84
3.3.1	Ensaio no concreto no estado fresco	88

3.3.2	Ensaio no concreto no estado endurecido	89
3.3.2.1	<i>Resistência à compressão axial</i>	89
3.3.2.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	90
3.3.2.3	<i>Módulo estático de elasticidade à compressão</i>	90
3.3.2.4	<i>Análise microestrutural</i>	93
3.3.2.5	<i>Métodos estatísticos</i>	95
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
4.1	POZOLANICIDADE DO RESÍDUO DE VIDRO LAMINADO	99
4.1.1	Índice de atividade pozolânica com cal (IAP-cal)	101
4.1.2	Índice de atividade pozolânica com cimento (IAP-cim)	101
4.2	ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS NO CONCRETO	103
4.2.1	Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco	103
4.2.1.1	<i>Análise da consistência pelo abatimento de tronco de cone</i>	103
4.2.1.2	<i>Determinação da massa específica</i>	104
4.2.2	Avaliação das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido	105
4.2.2.1	<i>Resistência à compressão axial</i>	105
4.2.2.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i>	110
4.2.2.3	<i>Análise do módulo de elasticidade estático</i>	113
4.3	ANÁLISE MICROESTRUTURAL	116
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.1	CONCLUSÃO GERAL	131
5.2	CONCLUSÕES ESPECÍFICAS	132
5.2.1	Conclusões relativas ao resíduo de vidro laminado	132
5.2.2	Conclusões relativas ao concreto no estado fresco	133
5.2.3	Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido	133
5.2.4	Sugestões para futuros estudos	134
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Emissão de CO ₂ por kg de cimento produzido em alguns países.....	27
Figura 2.1 - Vidros de parabrisas armazenados no pátio.....	40
Figura 2.2 - Moagem do vidro laminado.....	41
Figura 2.3 - Lâminas de PVB separadas da película de vidro.....	41
Figura 2.4 - Resíduos separados ao final do processo.....	42
Figura 2.5 - Forno de fusão.....	44
Figura 2.6 - Inspeção e Controle de Qualidade.....	45
Figura 2.7 - Principais etapas do processo de fabricação da embalagem de vidro.....	45
Figura 2.8 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.....	49
Figura 2.9 - Resistência à compressão da Série 1.....	50
Figura 2.10 - Distribuição granulométrica dos seguintes materiais utilizados no estudo: cimento, pó de vidro e cinzas volantes.....	51
Figura 2.11 - Índice de atividade pozolânica do vidro e cinzas volantes.....	51
Figura 2.12 - Resistência à compressão relativa aos 7 e 28 dias.....	53
Figura 2.13 – Resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro.....	58
Figura 2.14 - Resistência à compressão dos concretos estudados por Shayan e Xu (2006)	60
Figura 2.15 – MEV dos concretos na pesquisa de Shayan e Xu (2004).....	62
Figura 2.16 – Micrografia e EDS de concreto com 30% do cimento substituído por resíduo de vidro.....	63
Figura 2.17 - Micrografia e EDS de concreto em que houve reação do resíduo de vidro no concreto.....	63
Figura 2.18 - Micrografia e EDS de concreto em que houve reação parcial ou inexistente do resíduo de vidro no concreto.....	64
Figura 2.19 – Micrografia de concreto com resíduo de vidro: ocorrência de reação pozolânica.....	65
Figura 3.1 – Organograma do programa experimental.....	72
Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) ..	73
Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) ..	74
Figura 3.4 - Distribuição granulométrica do CPV ARI.....	76
Figura 3.5 – Micrografias obtidas por MEV das partículas do CPV ARI.....	77
Figura 3.6 - Procedimentos realizados antes da caracterização do resíduo de vidro.....	78
Figura 3.7 - Resíduo de vidro ao chegar ao laboratório.....	78

Figura 3.8 - Equipamento utilizado para destorroar o RVL	78
Figura 3.9 - RVL antes e depois do destorroamento	79
Figura 3.10 - Moinho de argolas e resíduo de vidro laminado após processo de moagem	80
Figura 3.11 - Distribuição granulométrica do RVL	81
Figura 3.12 - Difratoograma de raios X do RVL	82
Figura 3.13- Micrografia obtida por MEV das partícula de RVL com ampliação de 10000X	82
Figura 3.14 - Comparação das curvas de granulometria do RVL e do cimento CPV ARI.....	83
Figura 3.15 - Aspectos das concretagens realizadas.....	87
Figura 3.16 - Preparação dos corpos de prova	88
Figura 3.17 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão	90
Figura 3.18 - Aparato para o ensaio de módulo de elasticidade.....	91
Figura 3.19 - Representação esquemática do carregamento para determinação do módulo de elasticidade	92
Figura 3.20 - Equipamento utilizado para realizar as microscopias.....	93
Figura 3.21 - Metalização das amostras	94
Figura 3.22 - Amostras metalizadas inseridas no MEV para análises	94
Figura 4.1 – Corpos de prova úmidos aos sete dias.....	101
Figura 4.2 - Resistência à compressão para verificação do IAP-cim	102
Figura 4.3 - Resistência à compressão axial.....	106
Figura 4.4 - Efeito do fator idade sobre a resistência à compressão axial.....	107
Figura 4.5 - Efeito do fator % de substituição sobre a resistência à compressão	108
Figura 4.6 – Resistência à compressão em função da relação a/c dos concretos	109
Figura 4.7 - Efeito da interação entre os fatores idade e percentual de substituição sobre a resistência à compressão axial.....	109
Figura 4.8 - Efeito do fator idade sobre a resistência à tração por compressão diametral	112
Figura 4.9 - Efeito do fator percentual de substituição sobre a resistência à tração por compressão diametral	112
Figura 4.10 - Efeito da interação entre os fatores idade e percentual de substituição sobre a resistência à tração por compressão diametral	113
Figura 4.11 – Módulo de elasticidade dos concretos.....	114
Figura 4.12 - Efeito do fator idade sobre o módulo de elasticidade	115
Figura 4.13 - Corpo de prova do concreto mostrando a fase agregado e meio ligante	116
Figura 4.14 - Imagem de concreto referência, interface pasta e agregado – MEV, ampliação 150x	117

Figura 4.15 – Micrografias dos concretos – ampliação 400x.....	118
Figura 4.16 - Micrografias dos concretos de referência em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS	119
Figura 4.17- EDS do ponto 1, marcado na pasta cimentícia de traço referência 4.16 (b).....	120
Figura 4.18 - EDS do ponto 2, marcado na pasta cimentícia de traço referência 4.16 (c)	121
Figura 4.19 - Micrografias dos concretos RV5 em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS.....	122
Figura 4.20 - EDS do ponto 1, marcado na Figura 4.19 (b) referente ao traçoRV5.....	123
Figura 4.21 - EDS do ponto 2, marcado na Figura 4.19 (c) referente ao traço RV5.....	123
Figura 4.22 - Micrografias dos concretos RV10 em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS.....	124
Figura 4.23 - EDS do ponto 1, marcado na Figura 4.22 (b) referente ao traço RV10.....	125
Figura 4.24 - EDS do ponto 2, marcado na Figura 4.22 (c) referente ao traço RV10.....	125
Figura 4.25 - Micrografias dos concretos RV15 em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS.....	126
Figura 4.26 - EDS do ponto 1, marcado na Figura 4.25 (b) referente ao traço RV15.....	127
Figura 4.27 - EDS do ponto 2, marcado na Figura 4.25 (d) referente ao traço RV15.....	127
Figura 4.28– Zonas de transição dos concretos – Ampliação 2.000x	128

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 - Possíveis utilizações de resíduos de vidro na construção civil	25
Quadro 2.1 - Pesquisas analisadas	46
Quadro 2.2 - Proporções das misturas realizadas por Shayan e Xu (2006).....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química do Vidro.....	33
Tabela 2.2 - Composições químicas do resíduo de vidro utilizado em pesquisas.....	33
Tabela 2.3 - Composição química do cimento utilizado em algumas pesquisas.....	34
Tabela 2.4 - Dados do segmento de vidros planos de 2003 a 2008.....	37
Tabela 2.5 - Faturamento do segmento de vidros de 2010 a 2011	37
Tabela 2.6 - Normas aplicáveis ao Vidro	38
Tabela 2.7 - Reciclagem de embalagens de vidro no mundo (2011)	39
Tabela 2.8 - Preço médio do vidro reciclável em alguns Estados Brasileiros.....	43
Tabela 2.9 - Preço do vidro Reciclado na Usina de reciclagem visitada.....	43
Tabela 2.10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão (em MPa) nas diferentes idades de ruptura.....	48
Tabela 2.11 - Proporções das misturas das argamassas de pesquisa de Kou e Poon (2009).....	49
Tabela 2.12 – Tamanho das partículas de vidro e índice de atividade pozolânica.....	52
Tabela 2.13 - Proporções das misturas	52
Tabela 2.14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração de concretos com resíduo de ETE	61
Tabela 2.15 - Proporção das misturas para a produção de blocos de alvenaria	66
Tabela 2.16 - Absorção de água, densidade e resistência à flexão.....	66
Tabela 3.1 - Variáveis envolvidas na pesquisa.....	70
Tabela 3.2 - Representação do projeto fatorial cruzado completo dos ensaios do concreto no estado endurecido	70
Tabela 3.3 - Propriedades físicas da areia utilizada.....	73
Tabela 3.4 - Caracterização da brita	74
Tabela 3.5 - Caracterização do cimento CPV-ARI	75
Tabela 3.6 - Resultados da determinação da umidade do RVL.....	81
Tabela 3.7 - Composição química do RVL	82
Tabela 3.8 – Comparação das propriedades do RVL e do cimento	83
Tabela 3.9 - Proporção de materiais para moldagem dos corpos de prova	85
Tabela 3.10 - Nomenclatura dos traços moldados de acordo com os percentuais de substituições em massa do cimento pelo resíduo e composição em massa das misturas.....	86
Tabela 3.11 – Classes de consistência segundo a NBR 8953 (ABNT, 2009).....	89

Tabela 4.1 - Comparação dos requisitos químicos mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992).....	100
Tabela 4.2 - Valores de resistência à compressão axial para verificação do IAP-cal	101
Tabela 4.3 - Proporção de materiais para moldagem dos corpos de prova	102
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de Pozolanicidade com cimento Portland.....	102
Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone	103
Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco.....	104
Tabela 4.7 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial.....	105
Tabela 4.8 - ANOVA do efeito da idade e do percentual de resíduo sobre a resistência à compressão	107
Tabela 4.9 – Relação água/cimento das misturas de concreto	108
Tabela 4.10 - Comparação Múltipla de Médias (CMM) dos valores de resistência à compressão axial aos 91 dias.....	110
Tabela 4.11 - Resultados dos valores médios de resistência à tração por compressão diametral	111
Tabela 4.12 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral.....	111
Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para cada mistura de concreto	114
Tabela 4.14 - Análise de variância do efeito da idade e do percentual de resíduo sobre o módulo de elasticidade	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABIVIDRO – Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano
- ANOVA – Análise de variância
- CH – Hidróxido de cálcio
- CMM – Comparação Múltipla de Médias
- CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente
- CPV ARI – Cimento Portland de alta resistência inicial
- CSH – Silicato de cálcio hidratado
- CV – Coeficiente de variação
- EDS – Energia dispersiva de raios X
- Fcal – Valor calculado de Fisher
- Ftab – Valor tabelado de Fisher
- LEMAC – Laboratório de Ensaio em Materiais de Construção
- MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
- PVB – Polivinilbutiral
- RAS – Reações álcali-sílica
- REF – Concreto referência
- RV5 – Concreto com substituição de 5% do cimento por resíduo de vidro laminado
- RV10 – Concreto com substituição de 10% do cimento por resíduo de vidro laminado
- RV15 – Concreto com substituição de 15% do cimento por resíduo de vidro laminado
- RVL – Resíduo de vidro laminado
- UFES – Universidade Federal do Espírito Santo
- ZT – Zona de transição

Capítulo 1

Introdução

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção civil ocupa uma posição de destaque na economia por ser uma das mais importantes atividades para o desenvolvimento econômico e social. Este setor consome grandes quantidades de recursos naturais e de energia, além de ser um grande gerador de resíduos. Mas além de consumir, a indústria da construção civil também tem a capacidade de absorver os resíduos gerados tanto por ela como por outras atividades econômicas, reutilizando-os incorporados aos materiais de construção, entre eles o concreto.

Segundo Neto (2005), a grande quantidade de geração de resíduos na construção civil está diretamente relacionada com o desperdício de materiais de construção e que para contornar essa situação é necessária a implantação de políticas públicas visando o controle, coleta, transporte e disposição final dos resíduos.

A incorporação de resíduos em concretos é um assunto que tem sido estudado com bastante frequência em todo mundo. Primeiramente pela necessidade de destinação final do resíduo,

uma vez que as leis ambientais estão mais rigorosas a cada dia, e também pelo concreto ser um material que tem alto potencial “empacotador”, ou seja, possui uma facilidade de incorporar diversos tipos de resíduos sem dano ao meio ambiente, além de melhorar algumas propriedades.

O resíduo a ser estudado neste trabalho é o resíduo de vidro laminado automotivo, que é constituído por duas ou mais chapas de vidros planos unidos por uma película plástica de polivinilbutiral (PVB) durante o processo de laminação.

Nos estudos já realizados com foco na incorporação de resíduos de vidro, a maior parte das pesquisas aponta melhores resultados quando este resíduo é utilizado na forma de pó, como substituto parcial do cimento, já que com granulometria mais fina, o resíduo de vidro tende a possuir alto índice de atividade pozolânica, melhorando as propriedades mecânicas da matriz cimentícia na qual este resíduo é inserido.

A utilização de resíduo de vidro com características pozolânicas na composição de materiais cimentícios visa diminuir a extração de matéria-prima para a produção do cimento Portland e possibilitar destinação final adequada a tais resíduos.

Além das vantagens ambientais e econômicas, estas adições possibilitam a melhoria de algumas propriedades da matriz cimentícia, pois as mesmas estão diretamente ligadas à produção de concretos de alta resistência e alto desempenho devido ao efeito químico relacionado com a formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto responsável pela maior fração de resistência das pastas de cimento. Estas adições também permitem a transformação de vazios através da ocupação destes espaços pelas pequenas partículas do resíduo, diminuindo a permeabilidade e, conseqüentemente, aumentando a durabilidade do material (GOBBI, MATTANA e MEDEIROS, 2011).

A modelo de comportamento ideal para a gestão de resíduos é a prevenção dos mesmos e quando isso não for possível, a reutilização e a reciclagem devem ser incluídas no ciclo de produção. Segundo Calmon (2007) a prevenção dos resíduos está intimamente ligada à melhoria dos processos de fabricação e à influência deste pensamento nos consumidores, que devem ser incentivados a demandarem produtos ecologicamente corretos.

A busca pela reutilização de resíduos industriais tem se mostrado constante nos grandes centros urbanos uma vez que os órgãos ambientais têm fiscalizado a geração desses resíduos e

criado uma legislação rigorosa no que se refere ao descarte dos mesmos. Algumas indústrias já buscam alternativas para reutilizar seus resíduos de forma a minimizar os gastos com a deposição em aterros e se adequar às leis ambientais.

A empresa que forneceu o resíduo de vidro para essa pesquisa encaminha os parabrisas danificados para uma indústria de reciclagem localizada em São Paulo – Brasil e depois do processo de moagem para a separação do PVB do vidro, o resíduo de vidro é encaminhado a fábricas de embalagens de vidro para ser incorporado no processo de fabricação. As fábricas de embalagens não conseguem absorver todo o resíduo produzido, gerando assim a necessidade de outras opções de aproveitamento.

Dada a importância do assunto apresentado, resolveu-se estudar a aplicação do resíduo de vidro laminado proveniente de parabrisas, diante da necessidade de outras aplicações para o resíduo de forma a evitar sua destinação em aterros sanitários. Este estudo se encontra dentro da linha de pesquisa de Resíduos e Subprodutos Industriais e Concretos e Argamassas.

1.1 Justificativa e importância do tema

A busca pela utilização racional dos recursos naturais tem se tornado cada vez mais constante de forma a preservar o meio ambiente, poupar recursos e diminuir os custos. A reciclagem é uma das condições para atingir o desenvolvimento sustentável. Segundo John e Agopyan (2000) a reciclagem é uma atividade que vêm desde a antiguidade motivada por razões práticas e econômicas. A utilização de resíduos como materiais de construção deve estar associada à proposta de desenvolvimento de produtos que contenham resíduos capazes de competir no mercado e contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Sustentabilidade tornou-se uma das principais discussões em diversas áreas tais como política indústria e em meios acadêmicos (CHEN *et al.*, 2013). Essas discussões são o resultado da percepção de que a ação do homem tem causado grandes transformações na natureza como o aquecimento global, poluição do ar e água, consumo acelerado dos recursos naturais não renováveis e outros. O setor da construção civil vem contribuindo de forma significativa para o avanço das transformações ocorridas na natureza uma vez que a sua principal função é a transformação do ambiente natural em um ambiente adequado ao desenvolvimento das mais diversas atividades (JOHN e AGOPYAN, 2000).

A partir do início do século XXI houve um aumento de iniciativas para desenvolvimento de alternativas de reutilização e reciclagem dos resíduos antes considerados apenas como “lixos” tendo como único destino os grandes aterros sanitários. A resolução nº 307 do Conselho Nacional do meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002) é um exemplo prático dessas iniciativas. Essa resolução surgiu da necessidade de diretrizes para a redução dos impactos ambientais causados pelos resíduos gerados pela construção civil. Essa questão ambiental está sendo discutida intensamente e as pesquisas desenvolvidas estão presentes em diversas áreas de estudos. O objetivo central dos estudos é preservar a matéria-prima e dar um uso adequado ao que hoje é considerado como descartável. Com esse foco muitas empresas já estão buscando soluções para destinação dos resíduos que produzem, com o intuito inicial de diminuir os custos com a deposição em aterros além de evitarem problemas futuros em relação às legislações ambientais.

Atualmente, resíduos que possuíam destinação final apenas em aterros sanitários estão sendo beneficiados e depois comercializados com o intuito de empregá-los no processo de fabricação de outro produto. Essa prática traz benefícios tanto para as empresas envolvidas quanto ao meio ambiente, tais como:

- Diminuição dos custos com Aterros Sanitários;
- Lucro com a venda do resíduo;
- Minimização dos custos de aquisição de matéria-prima virgem;
- Redução do consumo de recursos naturais limitados;
- Diminuição de deposição de resíduos em aterros sanitários;
- Redução do consumo de energia em alguns casos;
- Redução das áreas necessárias para aterros sanitários, pela minimização de volume de resíduos destinados a reciclagem.

Alguns resíduos industriais como a cinza volante e a escória de alto forno, apresentam propriedades que permitem o uso como adições ao clínquer no preparo do cimento Portland, cuja produção segundo Oliveira (2000) é responsável por 7% das emissões de CO₂ na natureza.

Segundo John e Agopyan (2000) uma grande siderúrgica produz mais de um milhão de toneladas de escória de alto forno por ano que valem no mercado cerca de 10 milhões de reais, e, a siderúrgica ainda ganha com a eliminação das despesas com o gerenciamento do

resíduo. Quando se estuda e desenvolve-se uma solução para o resíduo, a reciclagem se torna muito atrativa às empresas, pois se torna uma ferramenta de redução de custos e de geração de novas oportunidades de negócios.

No Brasil a resolução nº307 CONAMA (BRASIL, 2002) foi uma das primeiras ações com o objetivo de orientar a destinação dos resíduos da construção civil. Porém não foram implantadas medidas rigorosas de fiscalização de forma a verificar se tais regras estão realmente sendo seguidas tornando difícil uma evolução do assunto nesse aspecto. Em vários países da Europa já existem decretos e regulamentações que tratam do gerenciamento e deposição dos resíduos com a aplicação de elevadas taxas sobre aqueles que são depositados no meio ambiente.

Para que os resíduos sejam utilizados na construção civil, os novos materiais produzidos com a incorporação de resíduos devem atender às exigências físicas, mecânicas e de durabilidade que às normas especificam de forma que sejam superiores ou similares aos produtos já existentes no mercado (Barboza *et al.*, 2008; Lima e Rossignolo, 2010). Essas exigências são necessárias uma vez que o setor da construção civil necessita oferecer materiais que possuam boa qualidade e vida útil prolongada.

O resíduo de vidro é foco de diversos estudos como objetivo de incorporá-lo na preparação de novos materiais na construção civil. Segundo a resolução nº307 do CONAMA (BRASIL, 2002) o vidro é considerado pertencente à Classe B (reciclável). Dessa forma, esses materiais deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura. No Quadro 1.1 encontram-se diversas utilizações para os resíduos de vidro na construção civil.

Quadro 1.1 - Possíveis utilizações de resíduos de vidro na construção civil

RESÍDUO	UTILIZAÇÃO
VIDRO	Pozolanas Sistemas de drenagem Agregados Fibra de vidro Bases e sub-bases de rodovias e ferrovias

Fonte: CALMON (2007)

Federico e Chidiac (2009), Luz e Ribeiro (2008), Ozkan e Yuksel(2008) dentre outros pesquisadores realizaram estudos utilizando o resíduo de vidro na preparação de alguns materiais de construção. Tais estudos avaliaram a incorporação desses resíduos na composição de argamassas, no preparo de concretos, como constituinte do cimento e em outros materiais de construção. A Austrália, por exemplo, utiliza o vidro moído proveniente do lixo para execução de concretos para a construção civil (ABIVIDRO, 2013).

No Brasil, em 2011, foram produzidos aproximadamente 3.000.000 toneladas de vidro, distribuída em embalagens (38,3%), vidros planos (49,2%), domésticos (7,1%) e especiais (5,4%). Dos vidros planos produzidos no mundo, 80% foram consumidos em aplicações na construção civil, 10% em aplicações automotivas e 10% em aplicações especiais. A reciclagem de vidro de todos os tipos no Brasil não é conhecida, só existem dados da reciclagem de embalagens. Admitindo-se que o mínimo reciclado é o que provém das embalagens, pode-se calcular a reciclagem de vidros no país em pelo menos 18% (MME, 2012).

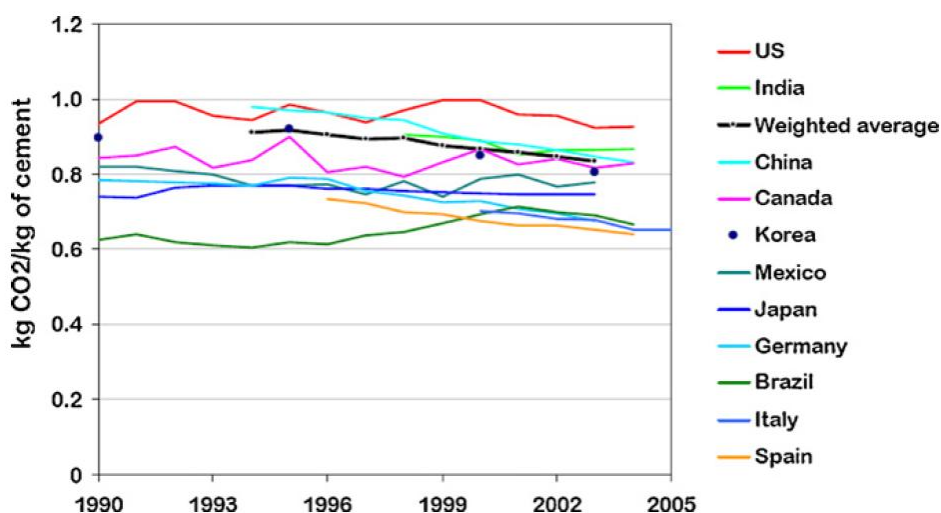
O setor de fabricação de vidros laminados está em constante crescimento devido principalmente à demanda na fabricação de veículos, que depende desse material, e ao crescimento acelerado do setor da construção civil, área que demanda uma quantidade elevada desse tipo de vidro. O vidro laminado é encontrado principalmente em parabrisas e em portas e janelas dos prédios.

A estrutura do vidro laminado possui três camadas: duas camadas externas de vidro e uma camada intermediária feita com um polímero orgânico denominado PVB (*poly vinyl butyral*). A camada intermediária é fortemente unida ao vidro, de forma que, se uma ou ambas as camadas externas se quebrarem, os estilhaços de vidro permanecerão unidos à camada do polímero. Esse mecanismo evita que o vidro se quebre de forma que possa ferir as pessoas em casos de colisões e outros acidentes.

Após a vida útil desse material, o mesmo se torna um problema ambiental devido à sua destinação final. Segundo Vargas e Wiebeck (2007, p.137), são descartados cerca de mil e oitocentas toneladas de vidro laminado de parabrisas mensalmente e o destino é o aterro sanitário. A reciclagem desse material possui como fator limitante a dificuldade em separar todo o PVB do vidro. Dessa forma qualquer aplicação que seja realizada com tal resíduo terá uma parcela pequena de PVB em sua composição.

A indústria cimenteira é uma das indústrias que mais contribui para a emissão de gases na atmosfera, especialmente de CO₂ (dióxido de carbono). A emissão do CO₂ é devido à calcinação de matérias-primas e a queima de combustíveis para manter temperaturas elevadas. Com o crescimento do setor da construção civil as emissões de CO₂ tendem a aumentar visto que o setor depende fortemente do cimento. A Figura 1.1 mostra a emissão de CO₂ em alguns países entre os anos de 1990 a 2005 (ALI, SAIDUR e HOSSAIN, 2011).

Figura 1.1 - Emissão de CO₂ por kg de cimento produzido em alguns países



Fonte: Ali, Saidur e Hossain (2011)

A redução de emissões de CO₂ é uma das questões ambientais mais discutidas em todo o mundo a fim de reduzir a concentração de gases que causam o efeito estufa. Segundo Ali, Saidur e Hossain (2011) uma das medidas para minimizar a emissão de CO₂ seria a utilização de adições no cimento de forma a minimizar o uso de clínquer na fabricação do cimento Portland.

Dessa forma, a proposta de incorporação do resíduo de vidro finamente moído como substituto parcial do cimento poderá minimizar os impactos ambientais, devido à emissão de CO₂, caso a hipótese seja confirmada. Além da questão da poluição do ar, é importante destacar que com a incorporação de resíduos na produção de um material, o consumo de matérias-primas não renováveis também tende a diminuir. As reservas de muitos materiais naturais já começaram a ficar escassas, especialmente junto aos grandes centros urbanos.

A busca de aplicações para o resíduo de vidro laminado baseia-se também no intuito de minimizar o impacto ambiental no momento da destinação final desse resíduo, visto que o PVB levaria em torno de 500 anos para ser assimilado pela natureza e o vidro é praticamente indestrutível (HOLZHEIN, 2006 apud VARGAS E WIEBECK, 2007). Os resíduos de vidro quando não absorvidos pela indústria de reciclagem são geralmente encaminhados para aterros sanitários onde permanecem por muitos anos, inutilizando o solo e provocando a desertificação do local.

Portanto, ao diminuir ou substituir algum composto de material do concreto pelo resíduo de vidro sem haver prejuízo em suas propriedades, haverá uma maior conservação de recursos naturais, diminuição da quantidade de lixo aterrada, assim como o desenvolvimento de novos materiais com um custo relativamente menor.

Através dos resultados desta pesquisa pretende-se confirmar a viabilidade técnica de uso do resíduo do vidro laminado proveniente dos parabrisas de automóveis como substituição parcial do cimento no preparo de concretos na construção civil. A proposta é de utilizar o resíduo de vidro finamente moído de forma a trabalhar com as características pozolânicas deste material. Com o aproveitamento do resíduo, a pesquisa estará contribuindo para o desenvolvimento sustentável do setor.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo geral

O projeto apresentado propõe avaliar a potencialidade do uso do resíduo de vidro proveniente dos parabrisas de automóveis como substituto parcial do cimento, enfocando as propriedades mecânicas dos concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição, fixando como referência a resistência de 40 MPa.

1.2.2 Objetivos específicos

Serão estudados e avaliados os resultados dos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dos concretos produzidos com

resíduo de vidro laminado em substituição parcial ao cimento comparando-os com o concreto de referência (sem o resíduo). Dessa forma os objetivos específicos do projeto são:

- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício pelo resíduo de vidro sobre as propriedades do concreto no estado fresco, avaliando a consistência conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1996) e a massa específica conforme a NBR 9833 (ABNT, 2009) comparando-os com amostras de concretos preparados sem a substituição (concreto de referência);
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício pelo resíduo de vidro no concreto através dos ensaios de resistência à compressão conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), comparando-os com amostras de concretos preparados sem a substituição (concreto de referência);
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício pelo resíduo de vidro no concreto através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), comparando-os com amostras de concretos preparados sem a substituição (concreto de referência);
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício pelo resíduo de vidro no concreto através dos ensaios de módulo de elasticidade de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2003), comparando-os com amostras de concretos preparados sem a substituição (concreto de referência);
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro sobre os aspectos microestruturais do concreto através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), comparando-as com as amostras sem substituição (concreto de referência).

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.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica sobre o resíduo de vidro laminado e os estudos já realizados utilizando esse resíduo.

No capítulo 3 é apresentado o procedimento experimental do trabalho, desde a amostragem do resíduo e dos outros materiais; caracterização física, química e ambiental do resíduo; caracterização dos componentes das misturas para produção do concreto bem como as propriedades mecânicas do concreto. Também constam do capítulo 3 as dosagens e os teores de substituição adotados para os concretos estudados no estado fresco e no estado endurecido e o preparo dos ensaios e moldagem dos corpos de prova utilizados para a realização dos ensaios.

No capítulo 4, estão os resultados obtidos no programa experimental. Inicialmente, são relatados os resultados relativos ao resíduo de vidro, no que tange a pozolanicidade. Em seguida, é apresentada a avaliação de propriedades relacionadas à determinação de características físicas e mecânicas dos concretos em estado fresco e endurecido.

No último capítulo, são apresentadas as conclusões específicas obtidas através das observações, resultados e análises relativas aos diferentes traços de concreto em estado fresco e endurecido. A análise microestrutural dos concretos endurecidos no capítulo anterior corrobora com algumas das conclusões específicas expostas neste capítulo. São apresentadas considerações a respeito deste estudo e sugestões para estudos futuros.

Ao final do volume, estão contidas as referências normativas e bibliográficas utilizadas para a produção deste trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo, inicialmente, será fornecido um embasamento teórico para o completo entendimento da problemática da pesquisa, apresentando conceitos relativos ao vidro, um breve panorama do mercado nacional do vidro e o processo de geração do resíduo de vidro laminado.

Serão expostas as principais pesquisas já realizadas que avaliam a utilização do resíduo de vidro em materiais de construção, porém serão focados os que utilizam esse resíduo em concretos.

2.1 Vidro

O vidro é uma substância inorgânica, amorfa e fisicamente homogênea. É obtido a partir do aquecimento de óxidos ou seus derivados até uma temperatura entre 1.600°C e 1800°C. Nessa temperatura os constituintes do vidro se tornam fluidos podendo passar pelo processo de moldagem e após essa etapa são resfriados em condições bastante controladas.

Em geral, os vidros possuem como constituinte principal a sílica ou o óxido de silício - SiO_2 (Tabela 2.1). Segundo Fragata *et al.* (2007) o vidro no estado amorfo é constituído essencialmente por sílica (SiO_2 - 72.5%) e uma menor percentagem de sódio (Na_2O - 13.2%) e cálcio (CaO - 9.18%). Na Tabela 2.2 é possível visualizar algumas composições químicas do vidro pesquisadas por diferentes autores, em estudos com aplicação do resíduo de vidro na produção de outros materiais.

Tabela 2.1 - Composição química do Vidro

Composto	(%)
SiO_2	72
Na_2O	14
CaO	9
Al_2O_3	0,7
MgO	4
K_2O	0,3

Fonte: Sichieri, Caram e Santos (2007)

Tabela 2.2 - Composições químicas do resíduo de vidro utilizado em pesquisas

Composto (%)	TOPÇU e CANBAZ (2004)	SHAYAN e XU (2006)	FEDERICO e CHIDIAC (2009)
SiO_2 (%)	70-75	72,4	63,79
Na_2O (%)	12-18	13	11,72
CaO (%)	5-14	11,5	13,01
Al_2O_3 (%)	0,5-2,5	1,45	3,02
Fe_2O_3 (%)	-	0,48	1,57
MgO (%)	-	0,65	0,89
K_2O (%)	0-1	0,43	0,54
SO_3 (%)	-	0,09	0,165

Fonte: Adaptado de Topçu e Canbaz (2004), Shayan e Xu (2006) e Federico e Chidiac (2009)

Na Tabela 2.3 é apresentada a composição química dos cimentos utilizados em algumas pesquisas com foco na utilização de resíduos de vidro a fim de comparações com a composição química do resíduo de vidro.

Tabela 2.3 - Composição química do cimento utilizado em algumas pesquisas

Composto (%)	Utilizado nessa pesquisa	Topçu e Canbaz (2004)	Shayan e Xu (2006)	Kou e Poon (2009)
SiO ₂ (%)	19,21	30,88	20,00	19,61
Na ₂ O(%)	-	-	0,18	0,13
CaO(%)	63,58	47,78	63,20	63,15
Al ₂ O ₃ (%)	5,15	6,75	4,30	7,33
Fe ₂ O ₃ (%)	2,90	3,57	3,40	3,32
MgO(%)	0,79	1,30	1,36	2,54
K ₂ O(%)	0,80	-	0,43	0,39
SO ₃ (%)	2,83	1,67	2,60	2,13

Fonte: Adaptado de Topçu e Canbaz (2004), Shayan e Xu (2006) e Kou e Poon (2009).

Com as Tabelas apresentadas, pode-se fazer uma comparação inicial dos principais componentes da composição do resíduo de vidro e do cimento. Os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e CaO fazem parte do sistema ternário da composição química dos principais cimentos encontrados no mercado brasileiro e ao analisar as composições químicas do resíduo de vidro apresentadas na Tabela 2.2, verifica-se que os óxidos somados ultrapassam 70% do total, o que indica esse resíduo como um material para fins cimentantes. Dessa forma é possível concluir que a substituição do resíduo de vidro por cimento em argamassas e concretos, possui grandes chances de ser viável.

Segundo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO (2013) o vidro pode ser classificado em três tipos quanto à variação da composição química:

- Vidro sodo-cálcico cuja aplicação é em embalagens em geral, garrafas, potes, indústria automobilística, construção civil e eletrodoméstico;
- Vidro boro-Silicato cuja aplicação é na fabricação de utensílios domésticos (Ex. panelas), possui a característica de resistir ao choque térmico além de apresentar uma beleza atrativa;
- Vidro ao chumbo para fabricação de copos, taças, cálices e peças artesanais.

O vidro também pode ser classificado quanto à função que o mesmo deverá desempenhar. Segundo a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano – ABRAVIDRO (2011) essa classificação pode ser feita da seguinte forma:

- Espelho: o vidro recebe sobre uma das superfícies uma camada metálica como a prata, alumínio ou cromo. Em seguida recebe várias camadas de tinta com a função básica de proteger o produto.
- Vidro anti-vandalismo: é um vidro multilaminado com a função básica de preservar ambientes contra ataques de pedras, marretas e outros. É composto por duas ou mais lâminas de vidro intercaladas com o polivinilbutiral (PVB) ou resina;
- Vidro anti-reflexo: os reflexos luminosos são eliminados sem alterar a capacidade de transmissão de luz. Esse tipo de vidro é ideal para molduras de pinturas, joalherias, vitrines de lojas, museus e outros;
- Vidro aramado: é considerado um vidro de segurança que possui incorporada em sua massa uma rede metálica quadriculada com a função de segurar os estilhaços de vidro na hora do rompimento da placa;
- Vidro auto-limpante: para a produção desse tipo de vidro é necessário a aplicação de uma película com uma camada de partículas de dióxido de Titânio (TiO_2). Esse vidro aproveita a força dos raios UV e da água da chuva para combater de forma eficiente a sujeira e os resíduos que se acumulam nos vidros;
- Vidro comum: geralmente não recebem nenhum tipo de tratamento e esse vidro é muito requisitado no mercado devido principalmente ao baixo custo, facilidade de manuseio, durabilidade e boa resistência química. Ele é a matéria prima para outros vidros planos;
- Vidro curvo: proporciona maior flexibilidade nos projetos arquitetônicos e o design diferenciado agrega estilo e modernidade. Um grande volume desse vidro, no Brasil, é destinado ao setor automobilístico (parabrisas).
- Vidro fotovoltaico: esses vidros permitem a absorção da radiação solar e a convertem em eletricidade através de pequenas lâminas de células fotovoltaicas que são instaladas em vidros simples.
- Vidro impresso: uma das principais características são os desenhos suaves e uniformes. É indicado para ser utilizado na construção civil, na indústria moveleira, em decoração de interiores e outros.
- Vidro insulado ou duplo: o vidro duplo possui função termo-acústica. Entre os dois vidros há uma camada interna de ar ou de gás desidratado – dupla selagem. Esse sistema pode ser composto por qualquer tipo de vidro (temperado, laminado, colorido,

incolor, metalizado e low-e), ou seja, é possível combinar vidros de propriedades diferentes.

- Vidro laminado: é um vidro de segurança composto de duas ou mais lâminas de vidro fortemente ligadas por uma ou mais camadas de polivinilbutiral (PVB). São utilizados em divisórias, portas, janelas, parabrisas de carro, vitrinas, sacadas e outros;
- Vidro low-e: são vidros baixo emissivos que impedem a transferência térmica entre dois ambientes. Isso é devido à aplicação de uma fina camada de óxido metálico em uma das faces do vidro. Ideal para fachadas, janelas e etc.;
- Vidro pintado a frio: o processo do vidro pintado a frio é feito com um compressor. No caso de ser necessária a utilização de um vidro temperado e pintado ao mesmo tempo, é preciso serigrafar o vidro ou temperá-lo antes do processo de pintura a frio.
- Vidro pintado a quente: no processo de fabricação do vidro serigrafado ou pintado a quente, a imagem que se deseja aplicar ao vidro é gravada em uma tela de poliéster e transferida para a peça de vidro, por meio de emissão luminosa;
- Vidro refletivo: o processo de transformação do vidro plano em refletivo consiste na aplicação de uma camada metalizada em uma das faces do vidro. Ele também pode ser laminado, duplo, serigrafado ou temperado;
- Vidro resistente ao fogo: são vidros laminados compostos por várias lâminas intercaladas com material químico transparente, como o gel intumescente, que se funde e dilata em caso de incêndio;
- Vidro temperado: o vidro comum é submetido a um processo de aquecimento e resfriamento rápido que o torna bem mais resistente à quebra por impacto, apresentando, assim, uma resistência até cinco vezes maior que a do vidro comum. Depois de temperado, o vidro não pode ser beneficiado, cortado, furado, etc. Portanto, qualquer processo de transformação tem de ser feito antes do processo de têmpera.

Quanto às suas características físicas, o vidro possui (SICHIERI, CARAM e SANTOS, 2007):

- Coeficiente de Dilatação = $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- Módulo de Elasticidade = 75 GPa;
- Tensão de Ruptura = 1.800 Kgf/cm²;
- Tensão de Compressão (Vidro Temperado) = 1000 Kgf/cm².

2.2 Panorama do mercado nacional de vidro

Basicamente, hoje no Brasil existem quatro indústrias de fornecimento de vidro, essas empresas são produtoras dos vidros float (comum) e impresso e são responsáveis pela fabricação de aproximadamente 1.800 toneladas de vidro por dia (ABRAVIDRO, 2011). Nas Tabelas 2.4 e 2.5 são apresentados dados do segmento do setor de vidros, nas quais mostram um crescimento no setor em ascensão principalmente de 2010 a 2011.

Tabela 2.4 - Dados do segmento de vidros planos de 2003 a 2008

Ano	Faturamento (milhões R\$)	Capacidade de Produção (mil toneladas)	Investimento (milhões US\$)	Exportações (milhões US\$)
2003	968	1050	66	92
2004	998	1240	63	115
2005	1033	1240	21	138
2006	1095	1240	25	139
2007	1183	1240	37	141
2008	1278	1280	230	130

Fonte: ABRAVIDRO (2011)

Tabela 2.5 - Faturamento do segmento de vidros de 2010 a 2011

Ano	Faturamento (bilhões R\$)
2010	4,9
2011	5,5

Fonte: MME (2012)

Assim que os vidros são fabricados pelas indústrias estes seguem diretamente para as transformadoras existentes na maioria dos Estados Brasileiros. Essas empresas beneficiam e preparam os vidros que serão aplicados na construção civil, indústria moveleira, automotiva e outras. A transformação é realizada através de processos de têmpera, laminação, lapidação, espelhação e outros de forma a estarem aptos para o consumidor.

2.3 Normas aplicáveis ao vidro

Algumas normas brasileiras aplicáveis ao vidro estão listadas na Tabela 2.6, sendo principalmente aquelas relativas a requisitos e especificações do vidro.

Tabela 2.6 - Normas aplicáveis ao Vidro

Norma	Descrição
NBR 11706 - Vidro na construção civil (ABNT, 1992)	Fixa as condições exigíveis para vidros planos aplicados na construção civil.
NBR14207- Boxes de banheiro fabricados com vidro de segurança (ABNT, 2009)	Especifica os requisitos mínimos, em termos de segurança, para os materiais utilizados no projeto e na instalação de boxes de banheiro fabricados a partir de painéis de vidro de segurança para uso em apartamentos, casas, hotéis e outras residências.
NBR14564: Vidros para sistemas de prateleiras - Requisitos e métodos de ensaios (ABNT, 2000)	Especifica as exigências de desempenho e medidas lineares necessárias para garantir a segurança da aplicação de vidro plano utilizado na composição de sistemas de prateleiras que tenham o vidro como componente de uso aplicado à sua utilização.
NBR14697 - Vidro laminado (ABNT, 2001)	Especifica os requisitos gerais, métodos de ensaios e cuidados necessários para garantir a segurança e a durabilidade do vidro laminado em suas aplicações na construção civil e na indústria moveleira, bem como a metodologia de classificação deste produto como vidro de segurança.
NBR14698 - Vidro temperado (ABNT, 2001)	Especifica os requisitos gerais, métodos de ensaios e cuidados necessários para garantir a segurança, a durabilidade e a qualidade do vidro temperado plano em suas aplicações na construção civil, na indústria moveleira e nos eletrodomésticos da linha branca.
NBR NM293 - Terminologia de vidros planos e dos componentes acessórios a sua aplicação (ABNT, 2004)	Estabelece os termos aplicáveis a produtos de vidro plano em chapas e acessórios usados na construção civil.
NBR NM294 - Vidro float (ABNT, 2004)	Estabelece as dimensões e requisitos de qualidade (em relação aos defeitos óticos e de aspecto) do vidro plano float, incolor e colorido, destinados aos mercados de arquitetura e decoração.
NBR NM298 - Classificação do vidro plano quanto ao impacto (ABNT, 2006)	Estabelece classificação de produtos de vidro plano, os requisitos e os métodos de ensaio para o vidro plano ser considerado como vidro de segurança.

2.4 A reciclagem do vidro

O crescimento da população e da economia mundial tem provocado um aumento considerável do consumo de materiais. A geração de resíduos torna-se inevitável e a busca por alternativas de destinação desses resíduos torna-se cada vez mais comum entre as indústrias.

A preocupação com resíduos de maneira geral é relativamente pequena no Brasil quando comparado a outros países da Europa. Existem muitos estudos no Brasil a cerca da utilização de resíduos na produção de novos materiais, porém não há uma política do governo de incentivo a compra de produtos ambientalmente saudáveis que privilegia produtos contendo resíduos. Na Tabela 2.7 são apresentados os índices de reciclagem de embalagens de vidro em diversos países, na qual mostra o Brasil como um dos países em que a reciclagem é muito baixa.

Tabela 2.7 - Reciclagem de embalagens de vidro no mundo (2011)

País	Índice (%)
Bélgica	96
Suécia	91
Holanda	91
Alemanha	81
República Tcheca	78
Itália	74
Brasil	47
França	68
Lituânia	67
Reino Unido	61
Portugal	57
Estônia	41
Eslováquia	37
Bulgária	34
Hungria	34
Romênia	26
Grécia	24
Turquia	20

Fonte: MME (2012)

Em regra, os resíduos deveriam ser tratados e depositados no local em que foram gerados. Todavia, isso raramente acontece devido à falta de planejamento das indústrias no momento da concepção do projeto. Tal debilidade leva as indústrias a procurarem destinação final para os resíduos gerados longe do local de remessa.

Dessa forma, o vidro laminado utilizado em parabrisas, após sua vida útil, deve retornar para as suas beneficiadoras e estas são responsáveis pela destinação final do resíduo de vidro. Algumas empresas optam por encaminhar os parabrisas inutilizados para uma usina de reciclagem a qual é responsável por separar as duas camadas do vidro da película intermediária do PVB através de processos de moagens.

2.4.1 Processo de obtenção do resíduo de vidro laminado

O processo descrito a seguir foi observado durante visita técnica a uma indústria de reciclagem em São Paulo que cedeu o resíduo de vidro laminado para a pesquisa.

Todo o material recebido é acumulado em um pátio e separado de acordo com sua proveniência e o tipo de vidro (Figura 2.1). Todo o vidro automotivo passa por moinhos diferenciados daqueles que são destinados à reciclagem dos outros tipos de vidro. Após a finalização do processo de moagem o resíduo de vidro automotivo é vendido principalmente à indústria de embalagens.

Figura 2.1 - Vidros de parabrisas armazenados no pátio



Fonte: Acervo pessoal

O processo de moagem do vidro automotivo é realizado até que as partículas de vidro praticamente se desprendam da lâmina de PVB. Apesar de transparente quando aplicada ao vidro no processo de beneficiamento do vidro automotivo, a lâmina de PVB, no momento em que é separado da lâmina de vidro, se torna opaca e apresenta-se partida em vários pedaços de tamanhos diferenciados (Figura 2.2 e 2.3).

Figura 2.2 - Moagem do vidro laminado



Fonte: Acervo pessoal

Figura 2.3 - Lâminas de PVB separadas da película de vidro



Fonte: Acervo pessoal

Para que a separação dos dois materiais seja eficaz, é necessário repetir o processo de moagem, no intuito de desprender das lâminas a maior quantidade possível de vidro. Na Figura 2.4 pode ser observado o resíduo de vidro resultante do processo.

Figura 2.4 - Resíduos separados ao final do processo



Fonte: acervo pessoal

Ainda na Figura 2.4 pode ser observada dentro do container, à frente da foto, a película de PVB no estado em que ele é descartado e, no montante de trás, o vidro moído ao final do processo, tal como é destinado às indústrias de embalagens. As partículas de PVB são destinadas a aterros sanitários.

Segundo os representantes da usina de reciclagem visitada, o resíduo de vidro automotivo resultante do processo de moagem apresenta, aproximadamente, de 5 a 10% de resíduos de borracha de parabrisas, que não são separadas no processo, uma vez que os vidros automotivos são recebidos quebrados juntamente com as borrachas de fixação. O processo de moagem apresentado é relativamente simples, compreendendo apenas a moagem dos parabrisas, não havendo qualquer outro tipo de transformação.

Com relação aos custos para gerenciamento e reciclagem, nas Tabelas 2.8 apresenta-se o preço do resíduo de vidro que pode ter uma variação altíssima dependendo do tipo de vidro e do local onde é vendido.

Tabela 2.8 - Preço médio do vidro reciclável em alguns Estados Brasileiros

LOCAL	VIDRO INCOLOR(R\$/t)	VIDRO COLORIDO(R\$/t)
Minas Gerais	200,00	225,00
Pernambuco	140,00	120,00
Rio de Janeiro	200,00	200,00
Rio Grande do Norte	400,00	-
Rio Grande do Sul	40,00	40,00
São Paulo - Bauru	80,00	140,00
São Paulo – Guarujá	70,00	70,00
São Paulo – São Bernado	120,00	80,00
Sergipe	30,00	30,00

Fonte: CEMPRE (2010)

Após a visita na usina de reciclagem, informações quanto ao preço praticado consta na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Preço do vidro Reciclado na Usina de reciclagem visitada

VIDRO INCOLOR (R\$/t)	VIDRO COLORIDO (R\$/t)	VIDRO LAMINADO (R\$/t)
170,00	50,00	40,00

Fonte: Acervo pessoal

O resíduo de vidro obtido através desse processo de moagem nessa usina é vendido para fábricas de embalagens de vidro nas quais o resíduo de vidro é incorporado ao processo de fabricação das embalagens visto que tal procedimento reduz consideravelmente o custo de energia dessas fábricas.

2.4.2 Incorporação do resíduo de vidro laminado na produção de embalagens

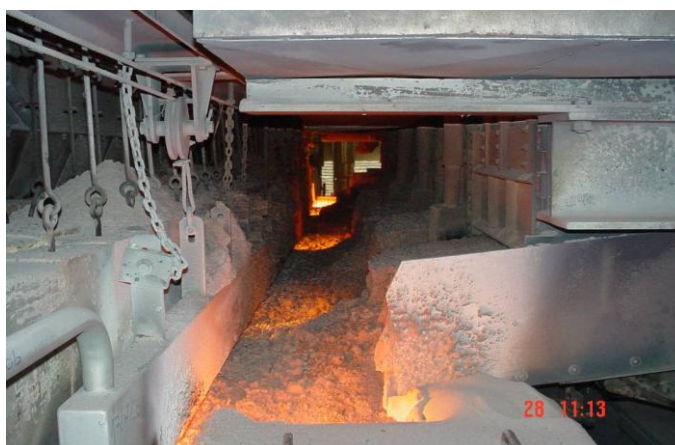
O processo de fabricação das embalagens de vidro inicia-se com a pesagem das matérias-primas e se for incorporado cacos de vidro reciclado o mesmo também deverá ser pesado. Essa pesagem é realizada de acordo com as quantidades estipuladas para produzir o vidro tipo sodo-cálcico.

A inclusão de caco de vidro no processo de fabricação de vidro reduz o gasto com energia. Várias indústrias de fabricação de embalagens já constataram que para cada 10% de caco de

vidro na mistura economizam-se 3 a 4% de energia necessária para a fusão em fornos industriais, reduz-se em 10% a utilização de água além de também reduzir a emissão de CO₂ na atmosfera. O consumo médio de água na indústria vidreira é cerca de 1,0 m³/t. (MME, 2012).

Após a pesagem dos materiais necessários a fabricação do vidro, os mesmos são levados aos fornos de fusão (Figura 2.5) nos quais são submetidos a temperaturas da ordem de 1500°C e 1600°C. Na sequência, a massa de vidro é submetida à etapa de afinagem e condicionamento com o intuito de eliminar gases e bolhas no interior da massa e manter a massa de vidro em uma temperatura inferior a de fusão para obter uma viscosidade apropriada à moldagem da embalagem.

Figura 2.5 - Forno de fusão



Fonte: CEBRACE (2012)

Em seguida a massa de vidro é transportada através de um canal de alimentação em que a temperatura do vidro fundido é uniformizada. Logo após, a massa é conduzida ao alimentador (feeder) onde são produzidas as gotas de vidro fundido posteriormente transferidas aos moldes de fabricação nos quais será aplicado o formato final das embalagens.

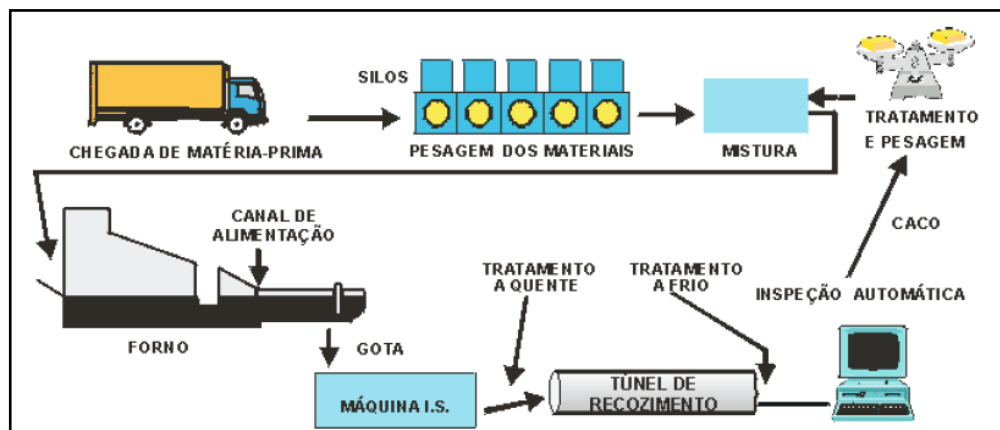
As embalagens com formato já definido passam pelo túnel de recozimento e antes de serem enviadas ao cliente passam por uma rigorosa inspeção automática para eliminação de embalagens fora das especificações pré-estabelecidas (Figura 2.6). A Figura 2.7 apresenta um esquema dos principais processos de fabricação das embalagens de vidro.

Figura 2.6 - Inspeção e Controle de Qualidade



Fonte: CEBRACE (2012)

Figura 2.7 - Principais etapas do processo de fabricação da embalagem de vidro



Fonte: Jaime e Ortiz (2000)

2.5 Estudos de aproveitamento dos resíduos de vidro na construção civil

Muitos estudos com foco na incorporação do resíduo de vidro na produção de outros materiais já foram realizados. Na área da construção civil a maior parte está voltada para aplicação em concretos e argamassas. A seção 2.5 foi dividida em três subseções de acordo com o emprego do resíduo. No Quadro 2.1 são apresentadas as pesquisas consultadas para essa revisão bibliográfica nas quais o resíduo de vidro foi utilizado como substituto de constituintes das argamassas e concretos.

Quadro 2.1 - Pesquisas analisadas

Título e autor	Ano	Origem	Publicação
Studies on concrete containing ground waste glass. <i>Shao et al.</i>	2000	Canadá	Cement and Concrete Research 30
Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto. Kruger, Oliveira e Braga.	2002	Brasil	25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química
Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. Park, Lee e Kim	2004	Coréia do Sul	Cement and Concrete Research 34
Value-added utilisation of waste glass in concrete. Shayan e Xu	2004	Austrália	Cement and Concrete Research 34
Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. <i>Shi et al.</i>	2005	Estados Unidos	Cement and Concrete Research 35
Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. <i>Corinaldesi et al.</i>	2005	Itália	Waste Management 25
Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. Shayan e Xu	2006	Austrália	Cement and Concrete Research 36
Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. <i>Chen et al.</i>	2006	China	Cement and Concrete Research 36
A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Shi e Zheng	2007	China	Resources, Conservation and Recycling 52
Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. <i>Sobolev et al.</i>	2007	México	Waste Management 27
Influence of a fine glass powder on cement hydration: comparison to fly ash and modeling the degree of hidration. Schwarz e Neithalath	2008	Estados Unidos	Concrete Research 38
Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. Taha e Nounu	2008	Inglaterra	Construction and Building Materials 22
Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products. Ozkan e Yukesel	2008	Turquia	Construction and Building Materials 22
Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. Kou e Poon	2009	China	Cementand Concrete Composites 31
Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. Ismail e Al-Hashmi	2009	Iraque	Waste Management 29

Quadro 2.1 – Pesquisas analisadas – cont.

Título e autor	Ano	Origem	Publicação
Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete. Taha e Nounu	2009	Inglaterra	Journal of Materials in Civil Engineering - December/09
Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento Portland. Paiva <i>et al.</i>	2010	Brasil	52° Congresso Brasileiro do Concreto
Viabilidade tecnológica para o uso do vidro moído em argamassa e concreto. Barroso <i>et al.</i>	2010	Brasil	52° Congresso Brasileiro do Concreto
Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. Chidiac e Mihaljevic	2011	Canadá	Cement & Concrete Composites 33
Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. Idir, Cyr e Tagnit-Hamou	2011	França	Cement & Concrete Composites 33
Verificação das atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. Araújo <i>et al.</i>	2011	Brasil	53° Congresso Brasileiro do Concreto
A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement. Khmiri, Samet e Chaabouni	2012	Tunísia	Construction and Building Materials 28
A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar Ling e Poon	2012	China	Journal of Cleaner Production 29-30
Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. Maier e Durham.	2012	Estados Unidos	Construction and Building Materials 29
Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. Matos e Sousa-Coutinho.	2012	Portugal	Construction and Building Materials 36
Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo – cálcico na produção de concretos Antônio, Aline Pignaton.	2012	Brasil	Dissertação de mestrado - UFES
Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. Nassar e Soroushian.	2012	Estados Unidos	Construction and Building Materials 29
The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos.	2012	Portugal	Construction and Building Materials 31
Utilisation of imploded glass in structural concrete Cassar e Camilleri	2012	Malta	Construction and Building Materials 29

Quadro 2.1 – Pesquisas analisadas – cont.

Título e autor	Ano	Origem	Publicação
Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties Du e Tan	2013	Cingapura	Cement and Concrete Composites 35
Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods Du e Tan	2013	Cingapura	Cement and Concrete Composites 35

Fonte: acervo pessoal

2.5.1 Estudos realizados com o aproveitamento em argamassas

O resíduo de vidro, nas pesquisas analisadas com aproveitamento em argamassas, foi usado como substituto parcial do agregado miúdo e/ou do material cimentício. O critério de escolha de qual substituição seria realizado foi principalmente em função do tamanho das partículas do resíduo de vidro. Por vezes, era necessário um processo de moagem a fim de que as partículas de vidro possuíssem o tamanho desejado. Segundo Maier e Durham (2012) o tamanho das partículas desempenha um papel muito importante uma vez que influenciam em possíveis reações álcali-sílica (RAS), prejudicando assim o desempenho mecânico e a durabilidade da matriz cimentícia.

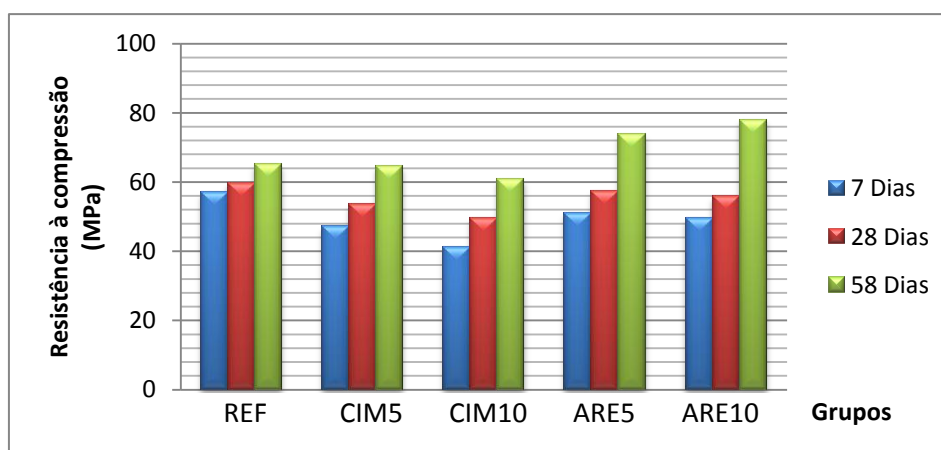
Kruger, Oliveira e Braga (2002) usaram o resíduo de vidro moído (passante na peneira #200) em porcentagens de 5 e 10% em substituição do cimento Portland e dos agregados miúdos em argamassas. Foi verificado que apenas as substituições da areia pelo vidro moído apresentaram um ganho na resistência à compressão considerável e que chegam a superar os resultados das amostras de referência conforme mostram a Tabela 2.10 e Figura 2.8.

Tabela 2.10 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão (em MPa) nas diferentes idades de ruptura

Traço da argamassa	Idades de ruptura		
	7 dias	28 dias	58 dias
REF - Cimento e areia	57,08	59,77	65,17
CIM5 - Cimento, areia e 5% de vidro substituindo o cimento.	47,13	53,54	64,59
CIM10 - Cimento, areia e 10% de vidro substituindo o cimento.	41,01	49,63	60,76
ARE5 - Cimento, areia e 5% de vidro substituindo a areia.	51,06	57,50	73,77
ARE10 - Cimento, areia e 10% de vidro substituindo a areia.	49,52	55,74	78,07

Fonte: Kruger, Oliveira e Braga (2002).

Figura 2.8 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão



Fonte: Adaptado de Kruger, Oliveira e Braga (2002).

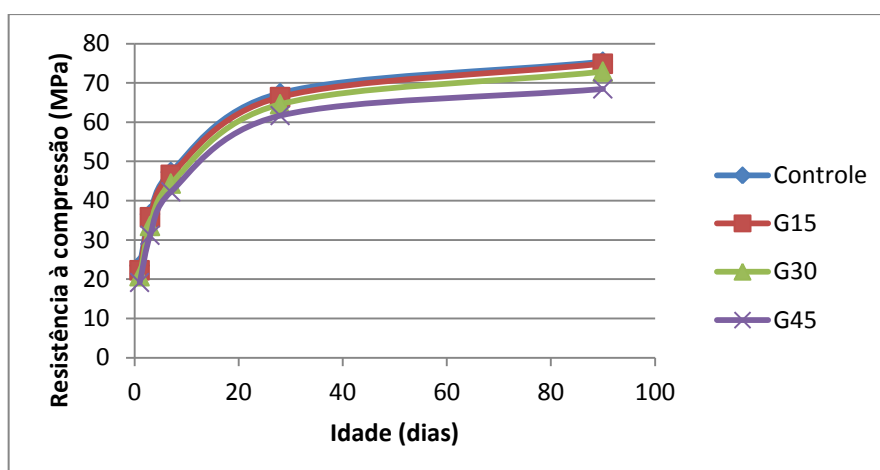
Kou e Poon (2009) também avaliaram a substituição de areia por vidro moído, porém a porcentagem de substituição foi de 15%, 30% e 45% divididas em duas séries, diferenciadas pela adição ou não de cinzas volantes, a fim de verificar as possíveis expansões devido à reação álcali-sílica. As partículas de vidro possuíam dimensões entre 5 e 10mm. As proporções das misturas são mostradas na Tabela 2.11. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão são apresentados na Figura 2.9.

Tabela 2.11 - Proporções das misturas das argamassas de pesquisa de Kou e Poon (2009)

Notações	Vidro moído (%)	Cimento (g)	Vidro Moído (g)	Areia (g)	Cinzas Volantes (g)
<i>Série 1</i>					
Controle	0	440	-	990	-
G15	15	440	148,5	751,5	-
G30	30	440	297	693	-
G45	45	440	445,5	544,5	-
<i>Série 2</i>					
Controle - F	0	440	-	844,5	145,5
G15-F	15	440	126,5	718	145,5
G30-F	30	440	253	591,5	145,5

Fonte: Kou e Poon (2009)

Figura 2.9 - Resistência à compressão da Série 1



Fonte: Kou e Poon (2009, p.110)

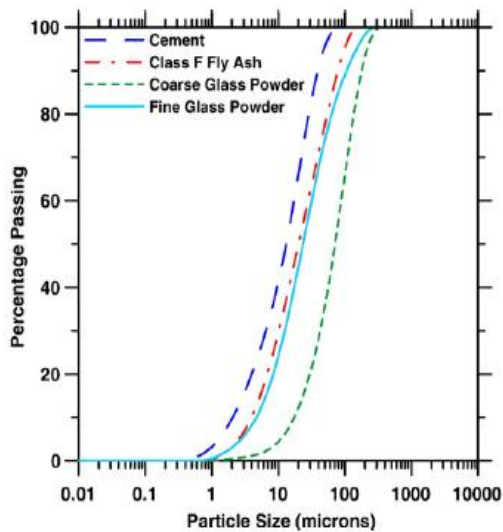
Na Figura 2.9 é possível visualizar a perda de resistência das argamassas preparadas com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro quando comparados com a argamassa de controle (sem substituição) nos ensaios realizados por Kou e Poon (2009). Estes resultados corroboram com os resultados encontrados por Barroso *et al.* (2010) que avaliaram a resistência à compressão de argamassas com substituição de 0, 20, 25, 30, 35, 50, 75 e de até 100% do agregado miúdo natural por resíduo de vidro moído. Barroso *et al.* (2010) também verificaram que resistência à compressão diminuiu com o aumento no teor de substituição.

Pesquisadores como Kou e Poon (2009), Park, Lee e Kim (2004), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Du e Tan (2013a; 2013b) estudaram a utilização de resíduo de vidro como substituto do agregado em argamassas e analisaram a possível reação álcali-sílica (RAS) que ocorre quando os álcalis do cimento reagem com a sílica do vidro formando um gel que expande na presença de água causando danos como fissuras e rupturas das argamassas. Os autores verificaram que a expansão nas argamassas preparadas com adições de cinzas volantes, escórias de alto-forno e outras adições foi reduzida significativamente, pois reduziram a alcalinidade e diminuíram a porosidade e permeabilidade das argamassas.

Corinaldesi *et al.* (2005), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), Shi *et al.* (2005), Sobolev *et al.* (2007), Paiva *et al.* (2010), Ling e Poon (2012), Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) e outros pesquisadores verificaram que o tamanho das partículas de resíduo de vidro influencia nas expansões RAS. Os autores constataram que o resíduo de vidro finamente moído se torna um inibidor da RAS, pois devido à grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição, este resíduo passa a apresentar alta atividade pozolânica.

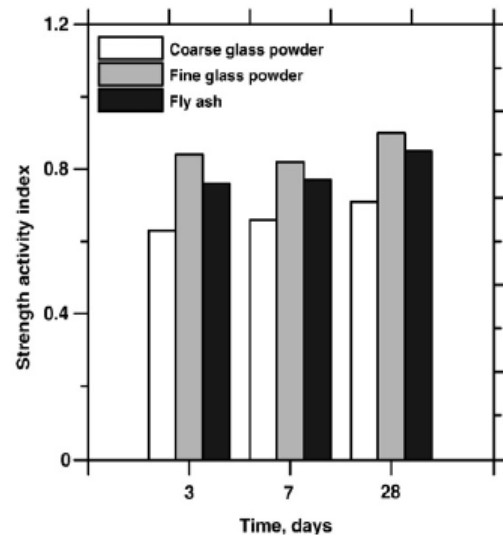
Schwarz e Neithalath (2008) realizaram uma série de ensaios a fim de comparar as propriedades do vidro moído com cinzas volantes. Na Figura 2.10 pode ser observada a granulometria dos materiais utilizados na pesquisa de Schwarz e Neithalath (2008).

Figura 2.10 - Distribuição granulométrica dos seguintes materiais utilizados no estudo: cimento, pó de vidro e cinzas volantes.



Fonte: Schwarz e Neithalath (2008)

Figura 2.11 - Índice de atividade pozolânica do vidro e cinzas volantes



Fonte: Schwarz e Neithalath (2008)

Conforme mostra a Figura 2.11, o vidro finamente moído exibiu níveis de pozolanicidade iguais ou maiores que as cinzas volantes em todas as idades estudadas. Shi *et al.* (2005) também concluíram através dos ensaios realizados que, o pó de vidro possui alta atividade pozolânica e que a expansão devido à reação álcali-sílica é reduzida em todas as substituições, porém as cinzas volantes são mais eficientes.

Na Tabela 2.12 podem ser visualizados os tamanhos das partículas usadas em algumas pesquisas correlacionando com o índice de atividade pozolânica determinado. A partir dessa Tabela é possível confirmar a conclusão de vários autores de que quanto menor o tamanho da partícula de vidro maior será sua pozolanicidade.

Tabela 2.12 – Tamanho das partículas de vidro e índice de atividade pozolânica

Tamanho das partículas	Índice de atividade pozolânica	Pesquisadores
Tamanho médio de 5 µm	104%	Paiva <i>et al.</i> (2010)
≤ 40 µm	85%	Khmiri, Samet e Chaabouni (2012)
≤ 75 µm	90%	Matos e Souza-Coutinho (2012)
≤ 75 µm	85%	Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)
≤ 60 µm	92% e 110%	Shi <i>et al.</i> (2005)
≤ 100 µm	90%	Idir, CyreTagnit-Hamou(2011)
≤ 100 µm	80%	Ismail e Al-Hashmi (2009)
≤ 100 µm	85%	Araújo <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Acervo pessoal

Matos e Souza-Coutinho (2012) analisaram algumas propriedades das argamassas quando parte do cimento era substituído por resíduo de vidro laminado proveniente de parabrisas de automóveis. Os autores verificaram que com o aumento do teor de resíduo de vidro, houve um decréscimo na consistência e um aumento na resistência à penetração de íons cloretos. No que se refere à resistência à compressão, houve ganhos significativos entre os 28 e 90 dias nas misturas com substituição do cimento por resíduo de vidro, o que indica a ocorrência de reação pozolânica.

Ozkan e Yuksel (2008) apresentaram uma investigação das propriedades das argamassas produzidas com substituições parciais do cimento por resíduos de vidro e subprodutos industriais: escórias de alto forno e cinzas volantes. As proporções das misturas são apresentadas na Tabela 2.13 e os resultados de resistência à compressão na Figura 2.12.

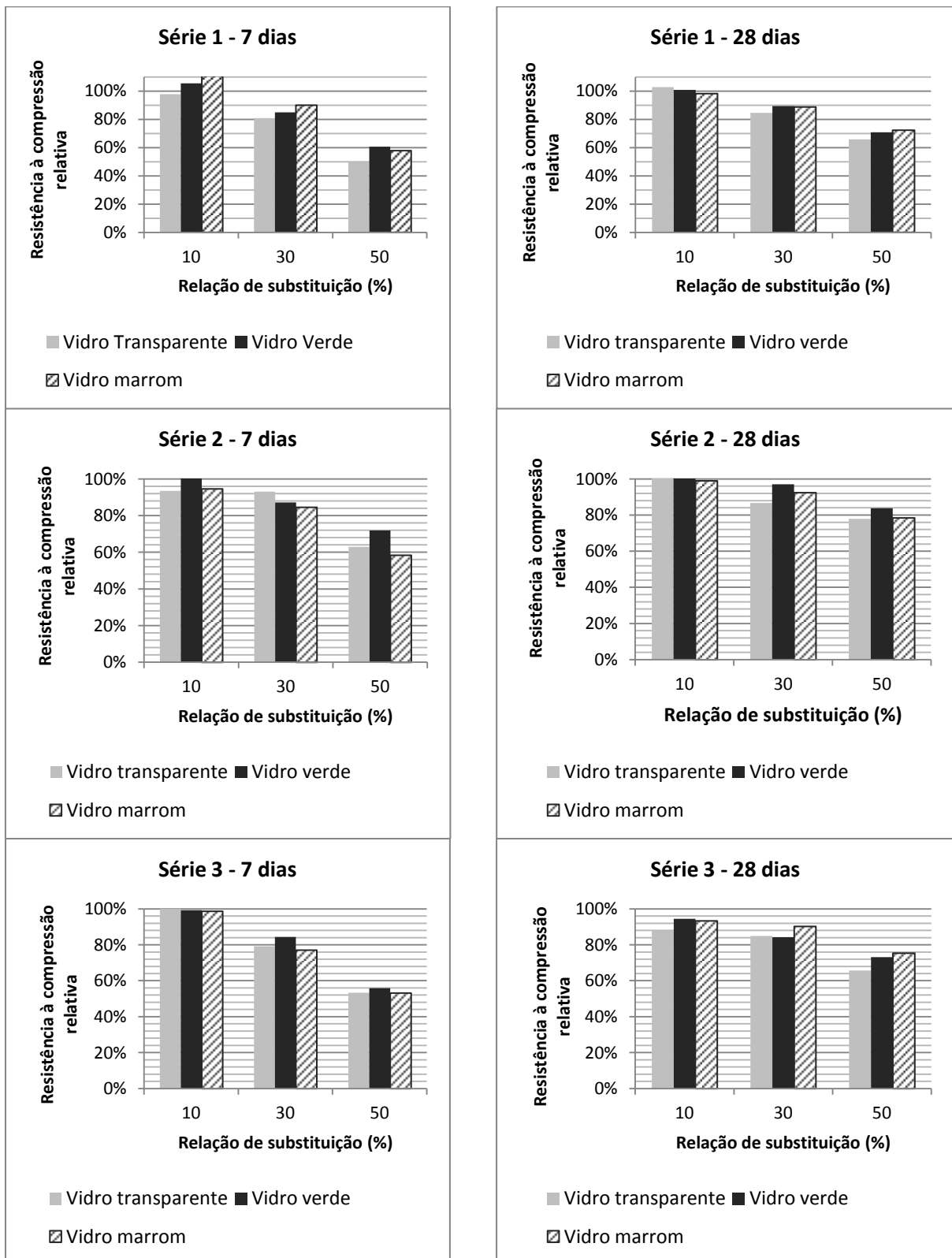
Tabela 2.13 - Proporções das misturas

Séries	Designação dos grupos			Detalhes da mistura	PC	WG	FA	GBFS
	Referência			100% PC	100	-	-	-
1	C10	G10	B10	90%PC+10%WG	90	10	-	-
	C30	G30	B30	70%PC+30%WG	70	30	-	-
	C50	G50	B50	50%PC+50%WG	50	50	-	-
2	CS10	GS10	BS10	90%PC+5%WG+5%GBFS	90	5	-	5
	CS30	GS30	BS30	70%PC+5%WG+15%GBFS	70	15	-	15
	CS50	GS50	BS50	50%PC+25%WG+25%GBFS	50	25	-	25
3	CF10	GF10	BF10	90%PC+5%WG+5%FA	90	5	5	-
	CF30	GF30	BF30	70%PC+15%WG+15%FA	70	15	15	-
	CF50	GF50	BF50	50%PC+25%WG+25%FA	50	25	25	-

PC: Cimento Portland; WG: resíduo de vidro; FA: cinzas volantes; GBFS: escoria de alto-forno; C: vidro transparente; G: vidro verde; B: vidro marrom; CS: C e GBFS; GS: G e GBFS; BS: B e GBFS; CF: C e FA; GF: G e FA; BF: B e FA.

Fonte: Ozkan e Yuksel (2008)

Figura 2.12 - Resistência à compressão relativa aos 7 e 28 dias



Fonte: Ozkan e Yuksel (2008)

Nos resultados de resistência à compressão apresentados na Figura 2.12, verificou-se que à medida que aumenta a proporção de substituição o valor da resistência diminui, exceto para algumas substituições às quais obtiveram um pequeno aumento. Para a idade de sete dias o valor máximo atingido foi 36,84 MPa que é 10,7% maior que o valor de referência, e, o valor máximo atingido para a idade de 28 dias foi 47,56 MPa que é apenas 3,8% maior que o valor de referência para essa idade.

Ozkan e Yuksel (2008) concluíram ainda que resíduos de vidro sem qualquer combinação podem substituir o cimento até em 30% e que quando combinados com cinzas volantes e escórias a substituição pode chegar até 50% sem prejuízos às propriedades das argamassas.

Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) estudaram argamassas com teores de substituição do cimento pelo resíduo de vidro nas proporções de 0, 10, 20, 25, 30 e 40%. Os resultados de resistência à compressão das argamassas mostraram que nenhuma das misturas alcançou a resistência da argamassa de referência, porém todas obtiveram um aumento na resistência considerável entre os 28 e 90 dias, indicando atividade pozolânica. Os autores verificaram também que com a diminuição do tamanho das partículas houve um aumento na resistência.

Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) também verificaram que as argamassas preparadas com substituição do cimento pelo resíduo de vidro atingiram resistências consideráveis aos 90 dias sendo que a substituição até 20% ultrapassaram a argamassa de referência.

2.5.2 Estudos realizados com o aproveitamento na produção de concretos

Optou-se por dividir essa seção em duas subseções: a primeira seção aborda as propriedades do concreto com resíduos de vidro no estado fresco e a segunda seção aborda os estudos das propriedades do concreto no estado endurecido e as possíveis propriedades pozolânicas do resíduo de vidro.

As pesquisas analisadas avaliaram a incorporação do resíduo de vidro como substituto parcial do agregado graúdo, agregado miúdo ou do material cimentício no preparo de concretos. Uma das restrições apontadas por alguns pesquisadores para utilização do vidro no preparo de concretos é a provável ocorrência de reação álcali-sílica (RAS) entre os álcalis do cimento e a sílica presente no vidro.

Taha e Nounu (2009) afirmam que a utilização do resíduo de vidro como substituto da areia em concretos possui alto risco de ocorrência da reação álcali-sílica, o que pode gerar fissuras e danos à durabilidade dos concretos. Os autores concluíram que para evitar a ocorrência de RAS deverá ser utilizado algum supressor desse tipo de reação, tais como escória de alto forno, metacaulim, pó de vidro pozzolânico e nitrato de lítio. Shi e Zeng (2007) também afirmam que para contornar a expansão devido a RAS podem ser utilizados adições minerais e um cimento pozzolânico.

Foi relatado por diversos autores que o tamanho das partículas pode influenciar diretamente no aparecimento da reação álcali-sílica, prejudicando fortemente a durabilidade das estruturas de concreto. Ismail e Al-Hashmi (2009), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), Shi *et al.* (2005), Ling e Poon (2012) e outros afirmam que as expansões devido a RAS são controladas quando o resíduo de vidro utilizado apresenta uma granulometria fina.

O vidro é um material amorfo e de acordo com sua composição química possui altos níveis de sílica que é um dos requisitos primários para seu funcionamento como material pozzolânico. Outro requisito para a determinação do grau de pozzolanicidade é a dimensão das partículas uma vez que a reatividade aumenta com a diminuição do tamanho das mesmas.

As duas subseções 2.5.2.1 e 2.5.2.2 irão apresentar apenas os resultados de pesquisas em que o resíduo de vidro foi utilizado em granulometrias mais finas, especificamente, como substituto do material cimentício, uma vez que o objetivo dessa dissertação é avaliar a utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento Portland em concretos.

2.5.2.1 Propriedades no estado fresco

A importância da trabalhabilidade em tecnologia do concreto é alta, independente da sofisticação usada nos procedimentos de dosagem. Uma mistura de concreto que não possa ser lançada facilmente ou adensada em sua totalidade provavelmente não apresentará características de resistência e durabilidade esperadas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A trabalhabilidade do concreto é influenciada por fatores intrínsecos ao concreto tais como relação água/materiais secos, tipo e consumo de cimento, traço, teor de argamassa e agregados. Além dos fatores intrínsecos existem fatores externos de influência como as condições de transporte, lançamento, densidade e distribuição das armaduras e outros.

Nassar e Soroushian (2012) verificaram que à medida que aumentava o teor de substituição de cimento por resíduo de vidro um ligeiro aumento na consistência do concreto era verificado. Já nos estudos de Antônio (2012) e Shayan e Xu (2006) as misturas que tiveram a substituição do cimento pelo resíduo de vidro apresentaram diminuição da consistência à medida que o teor de substituição aumentava.

Nos estudos de Taha e Nounu (2008, 2009) e Cassar e Camilleri (2012) o ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone não mostrou variação nos resultados nas amostras com substituição do cimento pelo resíduo de vidro. Taha e Nounu (2008) ainda afirmam que a incorporação do resíduo trouxe melhorias para as propriedades do concreto no estado fresco em razão das propriedades de forma e textura das partículas de vidro.

Os efeitos a cerca da massa específica dos concretos com resíduo de vidro relatados nos estudos de Nassar e Soroushian (2012) e Shayan e Xu (2006) foi que a medida que se aumentava o teor de resíduo de vidro na mistura a densidade diminuía já que a densidade das partículas de vidro eram inferiores à densidade do cimento.

Esses estudos corroboram os resultados de Taha e Nounu (2008, 2009) que também verificaram a diminuição da densidade do concreto devido à substituição do cimento pelo resíduo de vidro. Os autores também atribuem o efeito da diminuição da densidade do concreto à menor massa específica do resíduo de vidro em comparação com a do cimento.

Já nos estudos de Chidiac e Mihaljevic (2011) só houve diferença significativa para os resultados de densidade do concreto, nas misturas com teor de substituição de 25% as quais foram ligeiramente mais baixas do que as amostras de controle. A densidade dos concretos com 10% de substituição se equiparou com a densidade do concreto de controle.

Cassar e Camilleri (2012) estudaram concretos com teores de substituição do cimento pelo resíduo de vidro em proporções de 10 a 50%. Os autores verificaram que apenas para as misturas com 50% de substituição, a densidade foi menor do que o concreto de controle, enquanto os concretos com teores de substituição de 10 a 40% não houve diferença significativa com os resultados apresentados pelo concreto de referência.

2.5.2.2 Propriedades no estado endurecido

O concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo, o que o torna um material de grande importância para a construção civil. Os requisitos de desempenho mais solicitados do concreto, no estado endurecido, são a resistência e a durabilidade, sendo que essas propriedades são dependentes tanto das propriedades e proporções dos materiais que constituem o concreto como dos procedimentos de execução do mesmo.

As principais propriedades mecânicas do concreto são resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Essas propriedades poderão ser influenciadas com a incorporação de resíduos na matriz de concreto e em alguns casos podem ser até mesmo aperfeiçoadas. As propriedades mecânicas dos concretos produzidos com a substituição parcial do cimento por resíduo de vidro estão sendo assuntos de algumas pesquisas uma vez que esse resíduo poderá aprimorá-las em função das possíveis reações pozolânicas.

Taha e Nounu (2008) verificaram uma diminuição de 16% na resistência à compressão aos 28 dias dos concretos com substituição de 20% do cimento pelo resíduo de vidro. Apesar da diminuição os autores concluíram ser viável a substituição de parte do cimento pelo vidro finamente moído de forma a aproveitar suas propriedades pozolânicas.

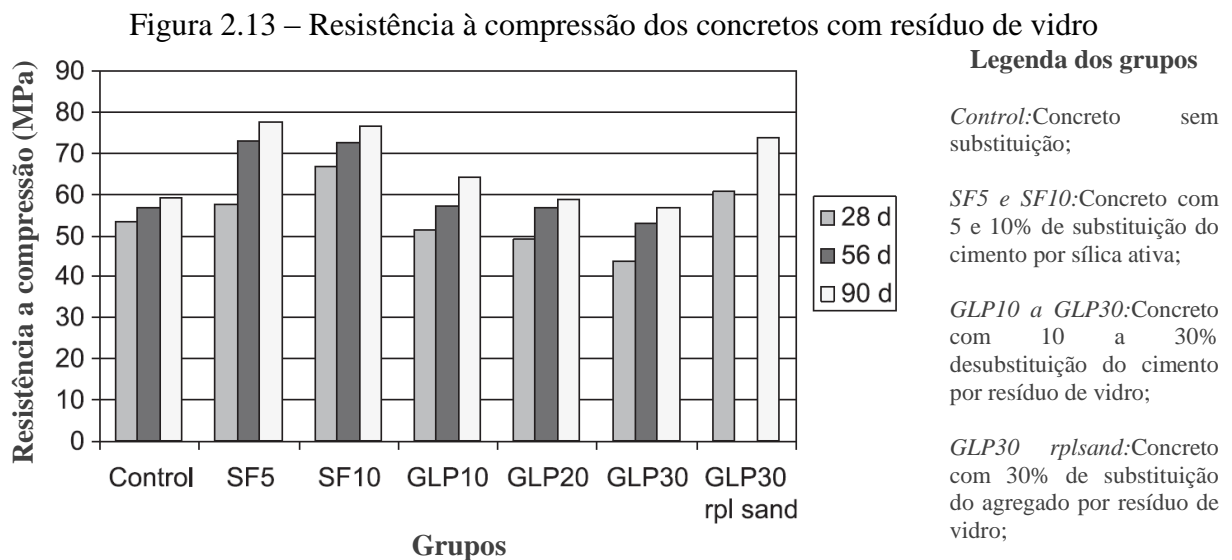
Cassar e Camilleri (2012) verificaram que das misturas com substituições de 0 a 50% de cimento por resíduo de vidro, apenas os concretos com 50% de teor de substituição não alcançaram a resistência à compressão projetada de 30 MPa. Os autores verificaram também que com o aumento da substituição a resistência à compressão dos concretos diminuía.

Cassar e Camilleri (2012) concluíram que o tamanho das partículas usadas na pesquisa (entre 100-600 μ m) eram superiores ao tamanho ideal para haver reações pozolânicas relatado em outros estudos. Ao comparar os resultados de resistência à compressão aos 28 e 90 dias confirmou-se a inexistência de reações pozolânicas, uma vez que não houve diferença entre os valores apresentados.

Segundo Chen *et al.* (2006) o vidro pode ser utilizado como substituto do cimento dependendo do tamanho das partículas, as quais devem ser inferiores a 75 μ m para que haja reação pozolânica e conseqüentemente ganhos na resistência do concreto. Os autores estudaram concretos com substituição parcial do cimento e areia por partículas de vidro finamente moídas (módulo de finura=0,94). Os resultados de resistência à compressão das

misturas com substituição apresentaram-se superiores aos resultados dos concretos de referência (sem substituição) em todas as idades.

Shayan e Xu (2004) verificaram que há um grande potencial na utilização de resíduo de vidro em concreto, principalmente quando este é usado na forma de pó. Os autores verificaram que os concretos com teores de substituição do cimento pelo resíduo de vidro apresentaram valores de resistência à compressão mais baixa do que as amostras de controle devido ao teor de cimento ser mais baixo nessas misturas, porém com o decorrer da idade os concretos com substituição foram ganhando resistência de forma a se aproximar do concreto de referência (Figura 2.13).



Fonte: Shayan e Xu (2004)

Chidiac e Mihaljevic (2011) estudaram a incorporação de resíduo de vidro na preparação de blocos de concreto. Os autores avaliaram a substituição de 10 e 25% do cimento pelo resíduo de vidro para a preparação dos concretos. Os resultados de resistência à compressão dos blocos preparados com concreto com resíduo de vidro atingiram a resistência mínima exigida e em um ano as amostras com 10% alcançaram a resistência da amostra de controle.

Shao *et al.* (2000) pesquisaram o uso de sílica ativa, vidro finamente moído e cinzas volantes em substituição ao cimento no concreto. Eles utilizaram substituições de até 30% do cimento e partículas com dimensões de 150 μ m, 75 μ m, e 38 μ m. Os autores verificaram que para substituições do cimento por partículas de vidro com granulometria de 38 μ m as propriedades mecânicas foram aprimoradas em função das reações pozolânicas, sendo que os concretos

com 30% de substituição do cimento por vidro com essa granulometria tiveram um ganho de 120% na resistência até os 90 dias.

Nassar e Soroushian (2012) utilizaram resíduo de vidro com partículas de tamanho médio de 13 μ m como substituto parcial do cimento na preparação de concretos com agregados reciclados. A utilização do resíduo de vidro nessa pesquisa teve o intuito de aproveitar suas propriedades pozolânicas de forma a melhorar as propriedades dos concretos com agregados reciclados. Os resultados foram concretos com uma maior durabilidade que apresentaram valores satisfatórios nos ensaios de absorção, permeabilidade e ataque por cloretos. A resistência desses concretos com resíduo de vidro apresentou bons resultados em idade mais avançada, por meio da melhoria das características dos poros, pois houve preenchimento dos mesmos pelas partículas de vidro, e a conversão de CH para C-S-H disponível na pasta de argamassa de cimento.

Segundo Nassar e Soroushian (2012) o aumento significativo da resistência em idade posterior (56 dias) foi conseguido através da formação de uma microestrutura densa e menos permeável, que deve ser o resultado do efeito de enchimento dos poros pelas partículas de vidro indicando a existência do efeito filler.

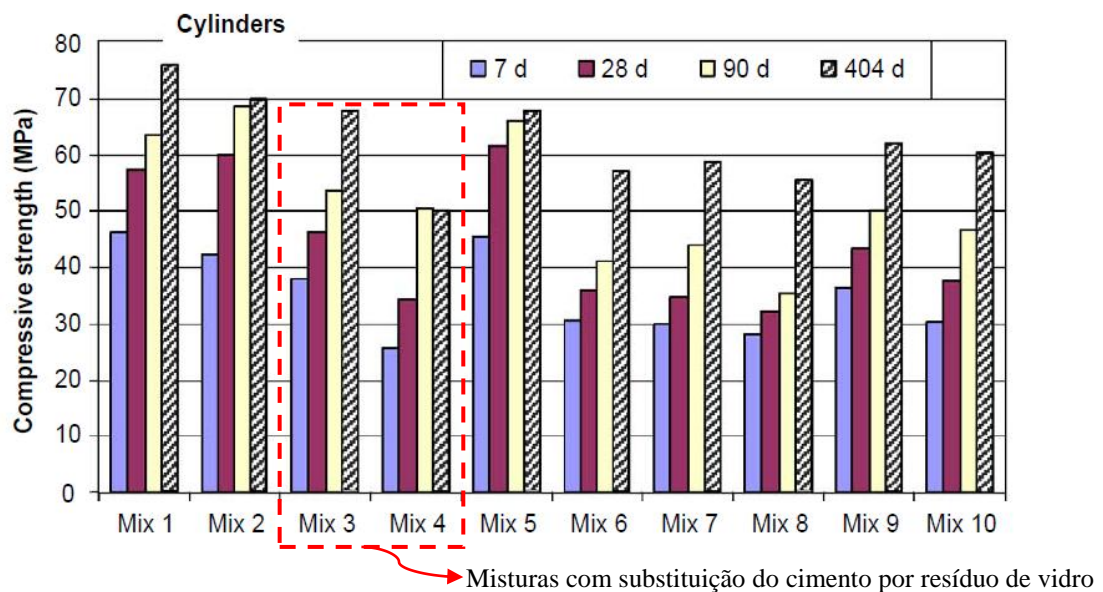
Shayan e Xu (2006) prepararam 10 misturas diferentes de concreto com utilização de resíduos de vidro em substituição da areia e do cimento conforme mostra o Quadro 2.2. Nos resultados dos ensaios de resistência à compressão verificou-se que aos 28 dias apenas três misturas, contendo 20% de resíduo de vidro, atingiram 40 MPa (concreto referência). No entanto, em 404 dias, todas as outras misturas contendo 30% de pó de vidro alcançaram a resistência de 55 MPa, apesar da redução de 30% de cimento nas misturas. Os autores concluíram que esse resultado indica o desenvolvimento de uma resistência maior que pode estar ligada a reação pozolânica entre as partículas de vidro e do cimento em idades mais avançadas (Figura 2.14).

Quadro 2.2 - Proporções das misturas realizadas por Shayan e Xu (2006)

Descrição	Proporções
Mix 1	Referência
Mix 2	10% de escória de alto-forno substituindo o cimento
Mix 3	20% de pó de vidro substituindo o cimento
Mix 4	30% de pó de vidro substituindo o cimento
Mix 5	10% de escória de alto-forno substituindo o cimento e 50% de vidro substituindo a areia
Mix 6	20% de pó de vidro substituindo o cimento e 50% de vidro substituindo a areia
Mix 7	30% de pó de vidro substituindo o cimento e 40% de vidro substituindo a areia
Mix 8	30% de pó de vidro substituindo o cimento e 75% de vidro substituindo a areia
Mix 9	50% de vidro moído substituindo a areia
Mix 10	100% de cimento, 50% de vidro substituindo a areia e 30 % de pó de vidro em massa de cimento substituindo a areia fina

Fonte: Adaptado de Shayan e Xu (2006)

Figura 2.14 - Resistência à compressão dos concretos estudados por Shayan e Xu (2006)



Fonte: Shayan e Xu (2006)

A partir da Figura 2.14 é possível constatar que das misturas que fizeram a substituição do cimento pelo resíduo de vidro (Mix 3 e Mix 4) apenas a mistura com 20% de substituição ultrapassou a resistência de projeto de 40MPa e teve um ganho de resistência à compressão considerável aos 404 dias. A mistura com 30% de substituição só alcançou a resistência de projeto aos 90 dias. Shayan e Xu (2006) concluíram que houve um desenvolvimento de reação pozolânica nessas misturas e que a diminuição na resistência é devida a redução do teor de cimento.

Antônio (2012) estudou a aplicação da utilização do resíduo de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos. O resíduo gerado por essa estação de tratamento possui uma grande quantidade de dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) resultante da utilização de flocculantes e clarificantes para o tratamento de efluentes provenientes dos galpões onde ocorre a lapidação das chapas de vidro.

Antônio (2012) estabeleceu em sua pesquisa teores de substituição do cimento (CPV-ARI-RS) de 0, 5, 10, 15 e 20% por resíduo de ETE coletado. Os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral foram realizados para as idades de 3, 7 e 28 dias (Tabela 2.14) e os ensaios de módulo de elasticidade após os 28 dias.

Tabela 2.14 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração de concretos com resíduo de ETE

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

Fonte: Adaptado de Antônio (2012)

A partir dos resultados obtidos, foi possível concluir que ao final dos 28 dias os concretos com 15% de substituição obtiveram os melhores resultados dentre os concretos preparados, apresentando os valores mais próximos aos do concreto de referência e a menor variação entre os corpos de prova rompidos. No que se refere à resistência à tração, constatou-se que não

houve variação significativa estatisticamente aos 28 dias de idade em nenhum dos concretos, independentemente do teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro da ETE.

Os estudos de Antônio (2012) corroboram com os resultados da pesquisa de Taha e Nounu (2008), a qual não se observou diferenças significativas nos resultados de resistência à tração apresentados pelos os concretos com resíduo de vidro substituindo o cimento e o concreto de referência.

Já nos estudos de Shayan e Xu (2006) verificou-se que com o aumento do teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro houve uma diminuição nos resultados de resistência à tração a qual foi verificada aos 130 dias.

Taha e Nounu (2008), Antônio (2012) e Chidiac e Mihaljevic (2011) verificaram que o módulo de elasticidade dos concretos com substituição do cimento por resíduo de vidro não mostraram diferenças significativas, ou seja, os resultados das médias pertenciam a um mesmo grupo homogêneo.

Shayan e Xu (2006) verificaram uma diminuição nos resultados de módulo de elasticidade das misturas com percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de vidro quando comparadas com a amostra de referência. Os autores constataram uma tendência de crescimento considerável do módulo de elasticidade em idades mais avançadas.

A Figura 2.15 mostra imagens obtidas a partir de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de concretos com substituição de 30% do cimento pelo resíduo de vidro em pesquisas realizadas por Shayan e Xu (2004).

Figura 2.15 – MEV dos concretos na pesquisa de Shayan e Xu (2004)

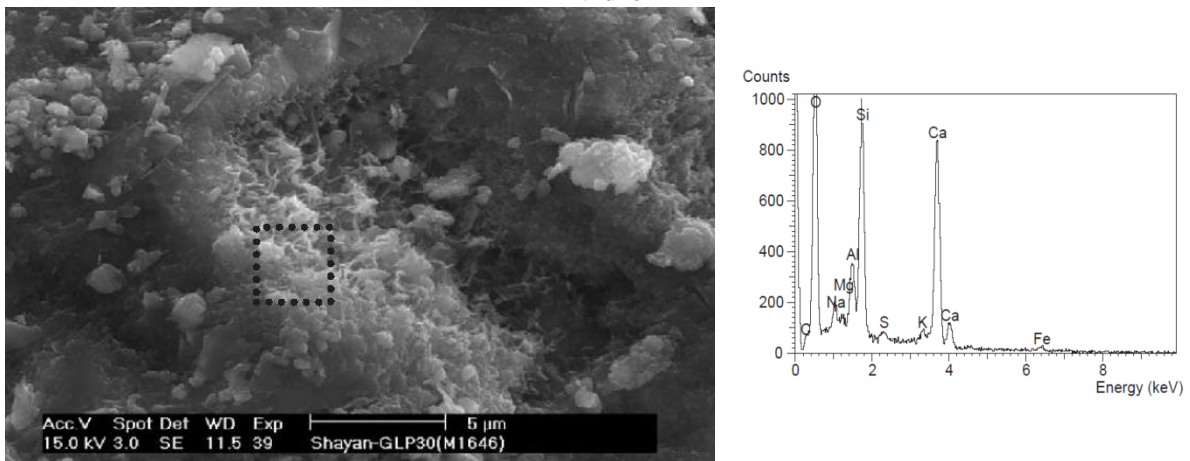


Fonte: Shayan e Xu (2004)

As imagens apresentadas nas Figuras 2.15 (a) e 2.15 (b) mostram a microestrutura densa que desenvolveu as pastas com incorporação de 30% de resíduo de vidro e ilustra o consumo de partículas finas de resíduo de vidro pela sua reação pozolânica (SHAYAN e XU, 2004).

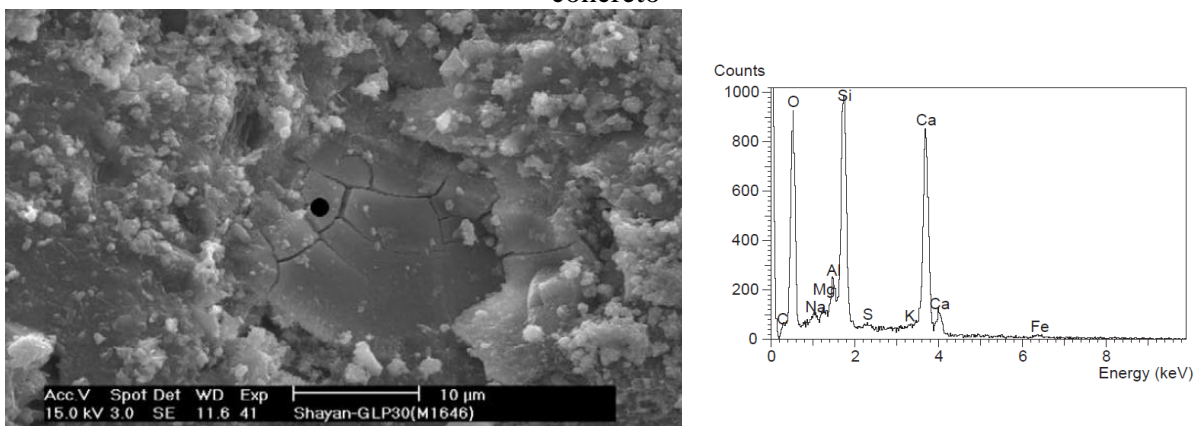
Ao analisar a microestrutura dos concretos com incorporação de resíduo de vidro, Shayan e Xu (2006) constataram enriquecimento de sílica, assimilação de partículas de vidro nas pastas e uma quantidade de (Na) elevado em algumas imagens analisadas que podem ser observadas na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Micrografia e EDS de concreto com 30% do cimento substituído por resíduo de vidro



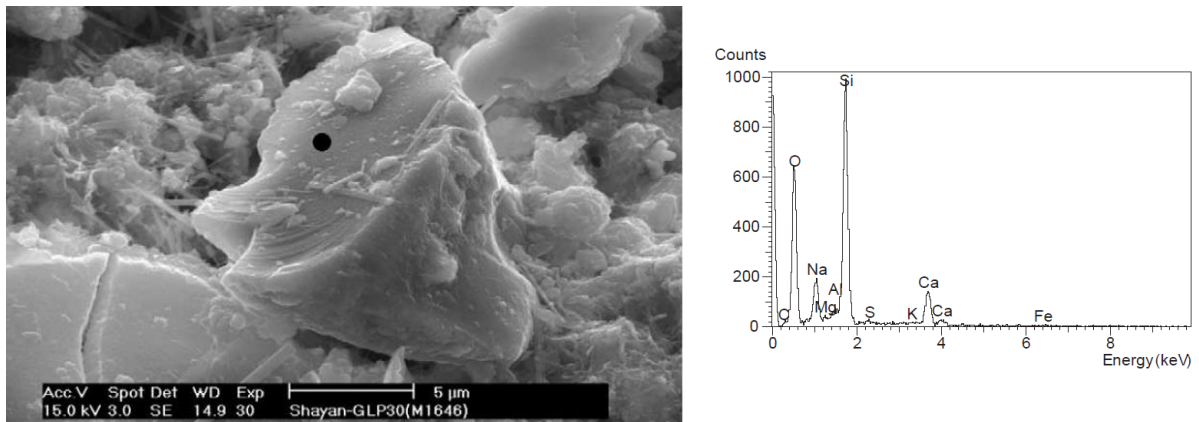
Fonte: Shayan e Xu (2006)

Figura 2.17 - Micrografia e EDS de concreto em que houve reação do resíduo de vidro no concreto



Fonte: Shayan e Xu (2006)

Figura 2.18 - Micrografia e EDS de concreto em que houve reação parcial ou inexistente do resíduo de vidro no concreto



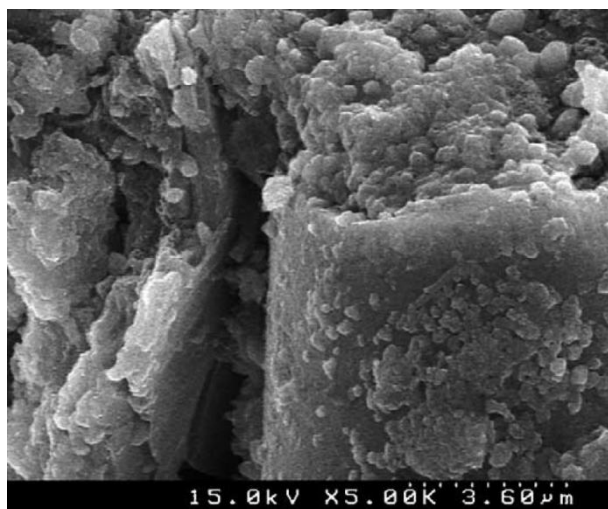
Fonte: Shayan e Xu (2006)

Shayan e Xu (2006) observaram algumas partículas ocasionais com cerca de 20µm de diâmetro, na mistura com 30% de substituição, que parecem ter reagido com o concreto e que o produto da reação continham pequenas quantidades de (Na) e grandes quantidades de (Ca) (Figura 2.17). Essa composição se mostrou diferente daquela verificada em que houve reação parcial ou inexistente do resíduo de vidro no concreto e que pode ser visualizada na Figura 2.18.

De acordo com Shayan e Xu (2006) as análises de micrografia eletrônica de varredura não mostraram nenhuma reação deletéria apesar do alto teor alcalino do resíduo de vidro e que os álcalis contidos originalmente no vidro foram ligados em materiais pastosos e cristalinos que resultaram da reação pozolânica do vidro.

Resultados da pesquisa de Chen *et al.* (2006) indicaram que as partículas de vidro desempenharam um papel muito importante nas misturas de concretos em todas as idades. Através das micrografias realizadas em amostras de concretos foi possível observar as reações pozolânicas que ocorreram com a formação de C-S-H conforme pode ser constatado na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Micrografia de concreto com resíduo de vidro: ocorrência de reação pozolânica



Fonte: Chen *et al.* (2006)

2.5.3 Estudos realizados com o aproveitamento em outros materiais

Vargas e Wiebeck (2007) desenvolveram um estudo em que utilizaram especificamente o resíduo de vidro laminado proveniente dos parabrisas dos automóveis na produção de vernizes de alto tráfego para pisos de madeira. O resultado obtido foi vernizes com resistência à abrasão superior aos encontrados no mercado.

Já os pesquisadores Luz e Ribeiro (2008) aplicaram o pó de vidro proveniente da lapidação de peças de vidro e respectiva lavagem para produzir o grés porcelanato. O feldspato, principal matéria-prima do porcelanato, é o material mais caro e, portanto, sua substituição representaria uma redução significativa no final das despesas. Nessa pesquisa foram preparadas diferentes misturas, de forma a analisar os resultados de retração linear em função da temperatura de queima, da absorção de água, da porosidade e da resistência à flexão. A partir dos resultados obtidos verificou-se que a adição de pó de vidro mostrou ser um eficiente fundente quando usado como aditivo em massas cerâmicas para produzir o porcelanato e pode substituir parcialmente o feldspato. Porém, há algumas restrições, pois foram verificados altos valores para a porosidade de todas as amostras estudadas e a que teve menor porosidade foi exatamente a que teve menor proporção de substituição do feldspato por pó de vidro.

Turguti (2008) realizou um estudo no qual verificou a viabilidade da utilização de resíduos de serragem de pedra calcária (WLS) na fabricação de blocos de alvenaria nas proporções mostradas na Tabela 2.15. Nesse estudo também aplicou uma porcentagem de resíduo de

vidro (WGP) juntamente com esse outro material. Os resultados mostraram um aumento tanto na resistência a compressão e flexão dos blocos produzidos com substituição do cimento por resíduos de vidro nas proporções de 25%, 50% e 75% em peso.

Tabela 2.15 - Proporção das misturas para a produção de blocos de alvenaria

Notação da mistura	Cimento (Kg/m ³)	Água (Kg/m ³)	a/c	WLS (Kg/m ³)	WGP (Kg/m ³)	WGP/c	Plastificante (Kg/m ³)	Total (Kg/m ³)
L-1	212	106	0,5	1657	-	-	-	1975
L-control	212	64	0,3	1697	-	-	2	1975
LG-1	212	64	0,3	1644	53	0,25	2	1975
LG-2	212	64	0,3	1591	106	0,50	2	1975
LG-3	212	64	0,3	1358	159	0,75	2	1975

Fonte: Turguti (2008)

Nos estudos de Bragança e Bergmann (2004) verificou-se que o uso de vidro do tipo soda-cal como fundente para substituir o feldspato, é viável para a produção de porcelanatos. Nos estudos verificou-se que o pó de vidro possibilitou a diminuição de 100°C na temperatura de queima, e isto significaria uma redução dos custos de produção, fato que torna a utilização desse resíduo muito atraente. A utilização dos resíduos de vidro apresentou resultados bons no que se refere à porosidade, pois para uma mesma temperatura de queima os valores foram inferiores ao do porcelanato referência (Tabela 2.16).

Tabela 2.16 - Absorção de água, densidade e resistência à flexão

Temperatura de queima (°C)	Porcelanato tradicional			Porcelanato com pó de vidro		
	Absorção de água (%)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à flexão (MPa)	Absorção de água (%)	Densidade (g/cm ³)	Resistência à flexão (MPa)
1200	5,52	2,22	23,8	2,13	2,25	30,7
1220	-	-	-	1,35	2,26	33,5
1240	2,55	2,35	27,7	0,39	2,28	37,9
1260	-	-	-	0,15	2,23	33,9
1280	1,53	2,41	36,0	1,06	1,84	19,6
1320	0,46	2,47	37,7	-	-	-
1340	0,34	2,48	45,7	-	-	-
1380	0,22	2,42	40,6	-	-	-
1420	0,59	2,16	25,0	-	-	-

Fonte: Bragança e Bergmann (2004, p.2384)

Além das formas de reutilização citadas, existem outras que ainda estão sendo desenvolvidas tais como: agregados para leitos de estradas, blocos de pavimentação, telhas e outros, porém ainda não há muitos estudos com esse foco.

Capítulo 3

Programa Experimental

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O procedimento experimental buscou avaliar a viabilidade técnica da utilização do resíduo de vidro laminado na preparação de concretos. Para isso, foram feitas primeiramente a caracterização dos materiais que foram utilizados no concreto bem como a caracterização do resíduo de vidro laminado.

3.1 Variáveis do programa experimental

O planejamento experimental foi realizado com o intuito de definir quais os dados, em que quantidades e em quais condições estes devem ser coletados durante os experimentos determinados. Esse planejamento visa basicamente aperfeiçoar a execução e análise dos ensaios que foram realizados para essa pesquisa.

Para isso, foram definidas primeiramente quais as variáveis envolvidas na pesquisa. Elas foram divididas em variáveis dependentes, variáveis independentes e variáveis de controle conforme mostram a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis envolvidas na pesquisa

Tipo de variável	Variáveis
Dependentes (variável resposta)	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência à compressão (Mínimo de 40 MPa); • Resistência à tração por compressão diametral; • Módulo de elasticidade.
Independentes	<ul style="list-style-type: none"> • Proporção de resíduos de vidro (0, 5, 10 e 15%); • Idade de realização de cada ensaio.
Controle	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de cimento (CPV ARI); • Tipo dos agregados; • Relação água/aglomerante ($a/agl = 0,53$); • Umidade da areia; • Procedimento de mistura; • Procedimento de cura.

Fonte: Acervo pessoal

Para cada etapa do programa experimental foram geradas diferentes combinações, uma vez que foram adotadas as variáveis que constam na Tabela 3.1. O estudo dos concretos no estado endurecido exigiu a produção de 220 corpos de prova, pois avalia a interação entre a porcentagem de resíduo utilizada em cada traço de concreto estudado e a idade de realização de cada ensaio, sendo os resultados dos ensaios realizados, as variáveis de respostas. Baseado nas definições de traço, idade de realização de cada ensaio e as variáveis respostas, foi possível estabelecer o número de corpos de prova a preparar através de um projeto fatorial cruzado completo, demonstrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Representação do projeto fatorial cruzado completo dos ensaios do concreto no estado endurecido

Fatores (variáveis independentes)	Nº de níveis	Níveis	Unidade	Nº de variáveis respostas	Variáveis de resposta
Proporção de resíduos de vidro na mistura	4	0, 5, 10 e 15	%	1	Resistência à compressão
Idade de realização de cada ensaio	4	3, 7, 28 e 91	dias	1	Resistência à compressão
Fatores (variáveis independentes)	Nº de níveis	Níveis	Unidade	Nº de variáveis respostas	Variáveis de resposta
Proporção de resíduos de vidro na mistura	4	0, 5, 10 e 15	%	1	Resistência à tração
Idade de realização de cada ensaio	3	3, 7 e 28	dias	1	Resistência à tração
Fatores (variáveis independentes)	Nº de níveis	Níveis	Unidade	Nº de variáveis respostas	Variáveis de resposta
Proporção de resíduos de vidro na mistura	4	0, 5, 10 e 15	%	1	Módulo de Elasticidade
Idade de realização de cada ensaio	2	7 e 28	dias	1	Módulo de Elasticidade

Tabela 3.2 - Representação do projeto fatorial cruzado completo dos ensaios do concreto no estado endurecido – cont.

Possíveis interações:

Proporções de resíduos x Idade de realização de cada ensaio

Projeto fatorial cruzado completo:

Cálculo para ensaios de determinação da resistência à compressão axial em todas as idades:

$$(a). 4 \times 4 \times 1 \times 6 = 96 \text{ (n}^\circ \text{ níveis proporção de resíduos x n}^\circ \text{ níveis idade x n}^\circ \text{ variáveis resposta x n}^\circ \text{ corpos de prova)}$$

Cálculo para ensaios de determinação da resistência à tração por compressão diametral em todas as idades:

$$(b). 4 \times 3 \times 1 \times 6 = 72 \text{ (n}^\circ \text{ níveis proporção de resíduos x n}^\circ \text{ níveis idade x n}^\circ \text{ variáveis resposta x n}^\circ \text{ corpos de prova)}$$

Cálculo para ensaio de determinação de módulo estático de elasticidade à compressão nas idades de 7 e 28 dias:

$$(c). 4 \times 2 \times 1 \times 6 = 48 \text{ (n}^\circ \text{ níveis proporção de resíduos x n}^\circ \text{ níveis idade x n}^\circ \text{ variáveis resposta x n}^\circ \text{ corpos de prova)}$$

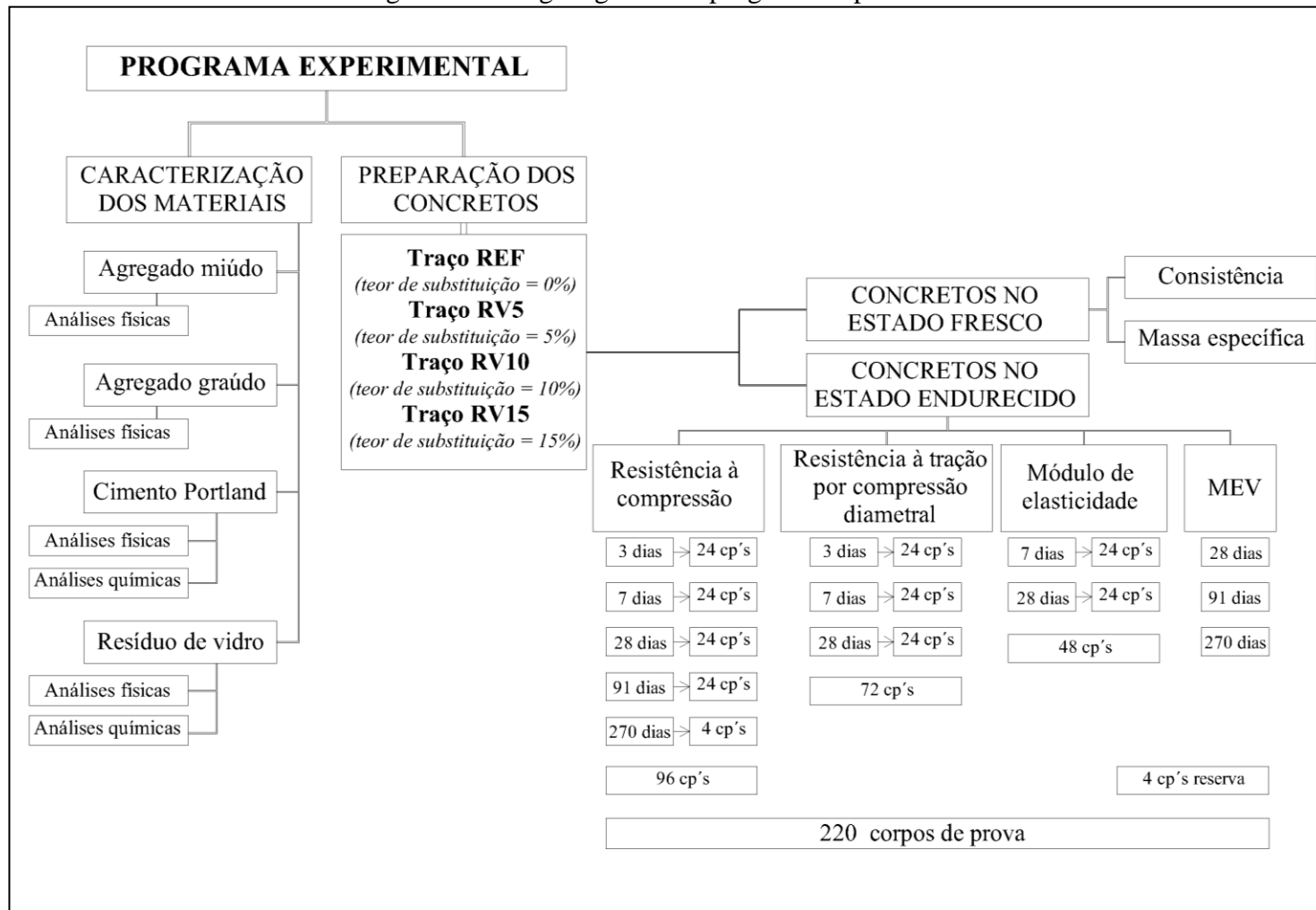
$$(a) + (b) + (c) + \text{reservas} = \text{n}^\circ \text{ total de corpos de prova}$$

$$96 + 72 + 48 + 4 \text{ (reserva)} = 220 \text{ corpos de prova}$$

Fonte: Acervo pessoal

Os ensaios foram realizados dentro do planejamento experimental nas datas previstas de forma que os equipamentos utilizados foram os mesmos em todos os procedimentos e os operadores mantiveram o mesmo procedimento durante os experimentos. A Figura 3.1 apresentada na próxima página mostra um organograma das fases de caracterização dos materiais utilizados e dos ensaios realizados no concreto.

Figura 3.1 – Organograma do programa experimental



Fonte: Acervo pessoal

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para o preparo dos 220 corpos de prova de concreto foram: areia natural de jazida, brita de origem granítica, cimento Portland CPV ARI, cedido pela Holcim, água fornecida pela concessionária local (CESAN) e resíduo de vidro laminado cedido por uma usina de reciclagem em São Paulo – Brasil.

3.2.1 Agregado miúdo

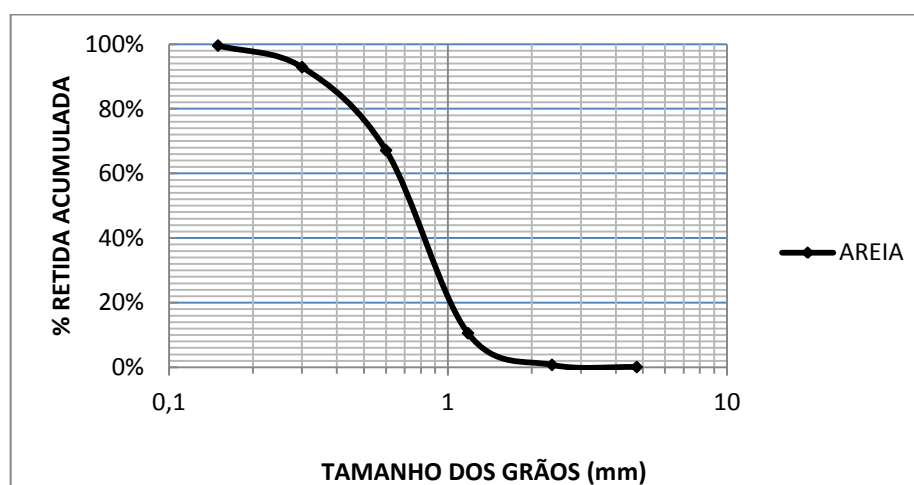
A areia utilizada como agregado miúdo é uma areia quartzosa proveniente de uma jazida classificada de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) dentro do limite da zona ótima com módulo de finura igual a 2,71. Os ensaios de caracterização da areia foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo – LEMAC/UFES. As propriedades físicas da areia estão descritas na Tabela 3.3 e a curva granulométrica está ilustrada na Figura 3.2.

Tabela 3.3 - Propriedades físicas da areia utilizada

Propriedades	Método de ensaio	Resultado
Dimensão máx.característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,71
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	0,27

Fonte: Acervo pessoal

Figura 3.2 - Curva granulométrica da areia de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003)



Fonte: Acervo pessoal

3.2.2 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no programa experimental é proveniente do processo de britagem de rochas graníticas e gnáissicas da região da Grande Vitória. Esse agregado foi lavado com o auxílio de uma peneira a fim de remover qualquer impureza que pudesse influenciar nas propriedades do concreto. Após esse procedimento a amostra foi seca ao ar e acondicionada em tambores plásticos até o momento da utilização. A caracterização da brita foi realizada no LEMAC/UFES e os resultados são apresentados na Tabela 3.4.

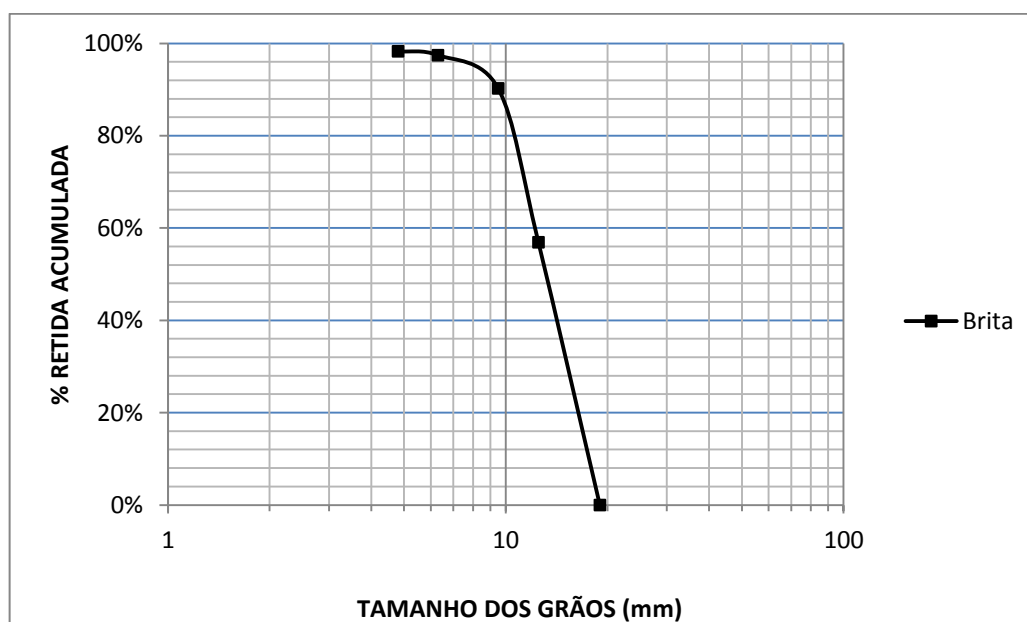
Tabela 3.4 - Caracterização da brita

Propriedades	Método de Ensaio	Resultados
Análise Granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Ver Figura 3.3
Dimensão Máx.Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	3,43
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,75
Massa Unitária (g/cm ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2003)	1,45
Absorção de Água	NBR NM 53 (ABNT, 2003)	0,45

Fonte: Acervo pessoal

A distribuição granulométrica da brita utilizada atendeu às normas brasileiras de regulamentação e apresentou limites próximos da zona granulométrica 9,5/25. A curva granulométrica da brita é apresentada na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Curva granulométrica da areia de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003)



Fonte: Acervo pessoal

3.2.3 Cimento

O cimento utilizado no programa experimental foi do tipo Portland de alta resistência inicial – CP V ARI de acordo com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). A escolha desse tipo de cimento se deu por o mesmo conter menor teor de adições, entre os disponíveis no mercado nacional, possibilitando uma melhor avaliação dos resultados com incorporação dos resíduos. A caracterização física e química, e a distribuição granulométrica do cimento CPV ARI foram fornecidas pelo fabricante, exceto a massa específica que foi determinada no LEMAC/UFES e estão apresentadas na Tabela 3.5 e na Figura 3.4.

Tabela 3.5 - Caracterização do cimento CPV-ARI

ENSAIOS	PERIODO	01.11.2011 17.11.2011	19.11.2011 06.12.2011	08.12.2011 24.12.2011	27.12.2011 12.01.2012	LIMITES NBR5733
ENSAIOS FÍSICOS						
# 400 (%) IT Holcim	Média	2,2	2,2	2,5	2,1	
	Desv. Padrão	0,26	0,38	0,41	0,15	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
Blaine (cm²/g) NBR NM 76	Média	4799	4788	4773	4767	≥ 3000
	Desv. Padrão	56	80	59	65	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
Início Pega (min) NBR NM 65	Média	125	124	121	133	≥ 60
	Desv. Padrão	8	6	5	5	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média	181	178	173	187	≤ 600
	Desv. Padrão	6	11	8	8	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média	27,8	28,0	28,2	27,9	≥ 14,0
	Desv. Padrão	0,40	0,87	0,64	0,78	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média	40,3	39,9	40,1	39,3	≥ 24,0
	Desv. Padrão	0,98	0,76	0,96	0,53	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média	44,1	44,0	43,7	44,2	≥ 34,0
	Desv. Padrão	0,61	0,67	0,47	0,54	
	Nº Amostras	8	8	8	8	
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média	52,6	53,3	53,3		
	Desv. Padrão	0,63	0,83	0,81		
	Nº Amostras	8	8	5		
Massa específica (g/cm³) NBR NM 23 (ABNT, 2000)		2,93*				

Tabela 3.5 - Caracterização do cimento CPV-ARI – cont.

ENSAIOS	PERIODO	01.11.2011 17.11.2011	19.11.2011 06.12.2011	08.12.2011 24.12.2011	27.12.2011 12.01.2012	LIMITES NBR5733
ANALISE QUIMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	3,86	3,76	3,74	3,68	≤ 4,5
SiO ₂	NBR 14656	19,05	19,21			
R.I.	NBR NM 15	0,86	0,93	0,95	0,92	≤ 1,0
Al ₂ O ₃	NBR 14656	5,11	5,15			
Fe ₂ O ₃	NBR 14656	2,90	2,90			
CaO	NBR 14656	63,32	63,58			
MgO	NBR 14656	0,81	0,79	0,79	0,78	
SO ₃	NBR 14656	2,76	2,83	2,79	2,76	≤ 4,5
CO ₂	NBR NM 20	2,58	2,51	2,69	2,65	≤ 3,0
K ₂ O	NBR 14656	0,79	0,80			
PF 500°C	IT Holcim	0,68	0,76	0,76	0,84	
C ₃ A (Teorico)	Equação Bogue	8,03	7,81	7,71	7,84	

OBSERVAÇÕES:

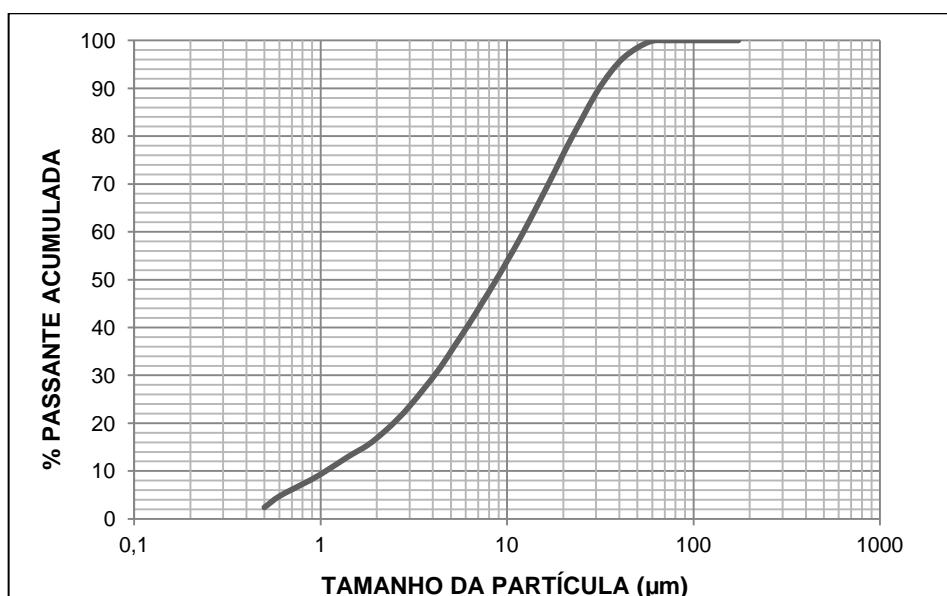
*Ensaio realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFES – LEMAC/UFES

1. IT = Instrução de Trabalho
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)

Tabela adaptada do Relatório de Ensaios de Cimento de 17 de janeiro de 2012, cedida pela Holcim.

Fonte: Cortesia de Cimentos Holcim

Figura 3.4 - Distribuição granulométrica do CPV ARI

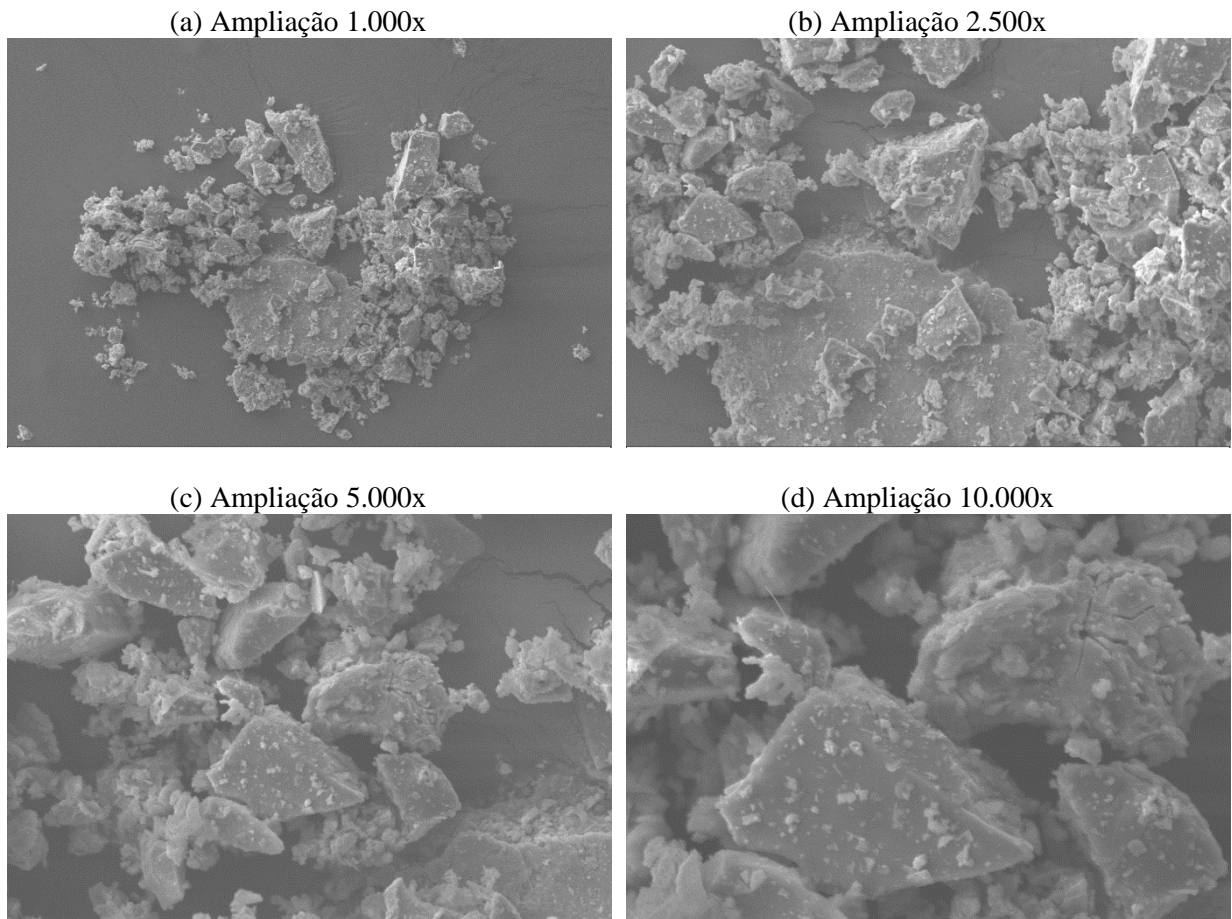


Fonte: Cortesia de Cimentos Holcim

Na Figura 3.5 podem ser observadas imagens do cimento obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), a partir de um microscópio da marca Zeiss, modelo EVO 40 XVP, no

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

Figura 3.5 – Micrografias obtidas por MEV das partículas do CPV ARI



Fonte: Acervo Pessoal

3.2.4 Resíduo de vidro laminado

O resíduo de vidro laminado (RVL) utilizado foi cedido por uma usina de reciclagem localizada em São Paulo - Brasil. Essa usina recebe o vidro laminado de refugos (parabrisas quebrados ou trincados) e processa este material através de moagens para separar a película de PVB do vidro. Tal procedimento não consegue separar totalmente estes materiais, por isso o resíduo de vidro resultante ainda possui uma pequena parcela de PVB em sua composição.

Para realizar a caracterização do resíduo, foram realizados alguns procedimentos que são apresentados na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Procedimentos realizados antes da caracterização do resíduo de vidro



Fonte: Acervo pessoal

O resíduo foi recebido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC-UFES) em tambores de 200l conforme mostra a Figura 3.7. Por se apresentar altamente compactado dentro do recipiente, foi necessário realizar primeiramente o destorroamento do resíduo com o auxílio de um destorroador (Figura 3.8).

Figura 3.7 - Resíduo de vidro ao chegar ao laboratório



Fonte: Acervo pessoal

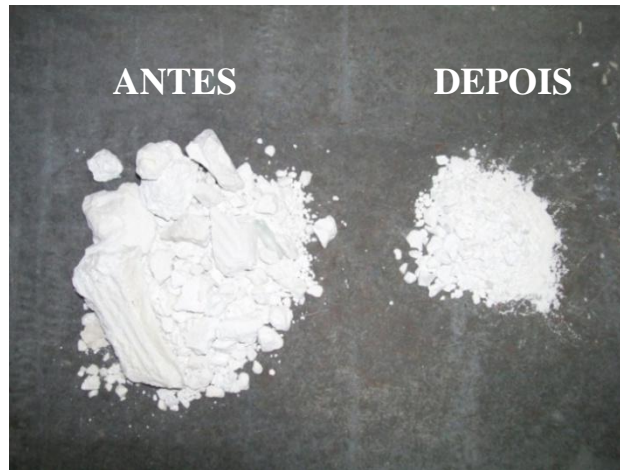
Figura 3.8 - Equipamento utilizado para destorrear o RVL



Fonte: Acervo pessoal

Após esse procedimento verificou-se que os grãos apresentavam-se ainda com uma dimensão superior ao desejado (Figura 3.9). Optou-se então pelo processo de moagem utilizando o moinho de argolas para que após a moagem, a finura do RVL se equiparasse com a finura do cimento. Porém, antes do processo de moagem, o resíduo foi homogeneizado, quarteado e acondicionado em sacos plásticos.

Figura 3.9 - RVL antes e depois do destorroamento



Fonte: Acervo pessoal

A metodologia para a determinação do processo de moagem do RVL foi determinada de forma que a finura do resíduo se equiparasse com a finura do cimento Portland determinada pela NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da peneira 75 μ m (n $^{\circ}$ 200) - Método de ensaio (ABNT, 1991). Para a realização da moagem foi necessário secar o resíduo em estufa à 105 $^{\circ}$ C por 24h, pois por se tratar de um material muito fino, o mesmo absorvia a umidade do ambiente com muita facilidade. Foram realizados vários testes e verificou-se que era necessário moer a fração de 50g do resíduo durante 40 segundos para que o RVL alcançasse a finura desejada. A Figura 3.10 mostra o moinho utilizado e o resíduo após o processo de moagem.

Figura 3.10 - Moinho de argolas e resíduo de vidro laminado após processo de moagem



Fonte: Acervo pessoal

Após esse processo de preparação do RVL foram realizados os ensaios de caracterização física e química. Os ensaios físicos realizados foram: determinação da massa específica, determinação da superfície específica, teor de umidade, análise granulométrica e índices de pozolanicidade. Já para a caracterização química foram realizadas análises químicas e mineralógicas.

A superfície específica foi determinada pelo método de Blaine, normatizado pela NBR NM 76 (ABNT, 1998) e apresentou o valor de $9.051 \text{ cm}^2/\text{g}$, muito mais fino que o cimento utilizado, que possui superfície específica média de $4.782 \text{ cm}^2/\text{g}$. A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), obtendo-se o valor de $2,31 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Como a massa específica do RVL é diferente da massa específica do cimento ($\gamma_{\text{cim}} = 2,93 \text{ g}/\text{cm}^3$), foi necessário efetuar uma compensação de volumes no momento do cálculo das quantidades de materiais a utilizar no preparo do concreto. Esse procedimento visa manter o volume de aglomerante na mistura constante, independente do percentual de substituição do cimento pelo resíduo, sendo que a massa de resíduo a ser utilizada é calculada em função das massas específicas do RVL e do cimento. A metodologia desse cálculo e as proporções das misturas são apresentadas na seção 3.3 – Preparação das misturas e ensaios.

Para a determinação de umidade tomou-se três amostras de resíduo de vidro pesou-se cada amostra. Após 24 horas em estufa a 105°C , as mesmas foram pesadas novamente de forma a determinar o teor de umidade em cada amostra. Os resultados encontram-se na Tabela 3.6.

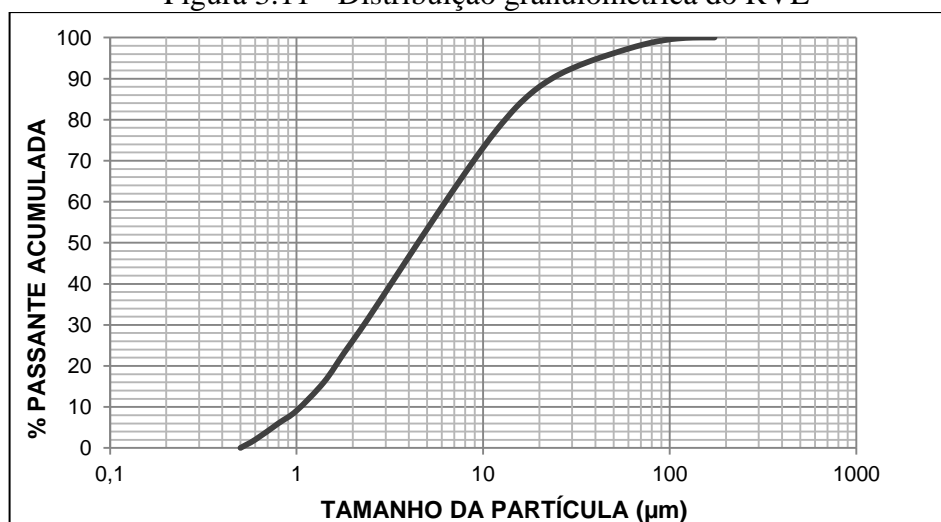
Tabela 3.6 - Resultados da determinação da umidade do RVL

Nº do Cadinho	Massa do Cadinho (g)	Massa total do RVL antes da secagem (g)	Massa do RVL + cadinho após secagem (g)	Teor (%)
1	20,334	51,5803	50,4304	3,82
2	21,2805	55,9468	54,6797	3,79
3	20,8834	57,9004	56,5405	3,81
<i>Teor de umidade médio:</i>				3,81

Fonte: Acervo pessoal

O ensaio de determinação da granulometria do resíduo foi realizado com o auxílio de um granulômetro à laser da marca Sympatech no LEMAC na UFES. O resultado do ensaio é apresentado na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Distribuição granulométrica do RVL



Fonte: Acervo pessoal

A análise química do RVL foi realizada no Laboratório de ensaios de materiais do Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER) em Natal – RN, através da técnica de fluorescência de raios-X (FRX) utilizando o equipamento EDX-720 da marca Shimadzu. Por limitação do método, somente elementos entre Na (11) e U (92) são analisados. Para a avaliação da perda ao fogo, o material após seco em estufa por 24 h em temperatura à 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos. O resultado deste ensaio é apresentado na Tabela 3.7.

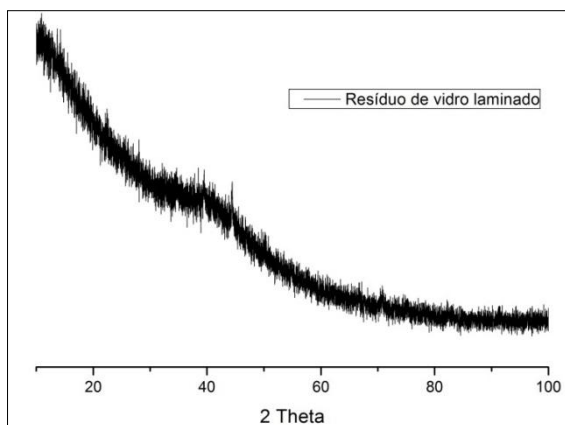
Tabela 3.7 - Composição química do RVL

Composto	Concentração (%)
SiO ₂	56,77
Na ₂ O	15,41
Al ₂ O ₃	6,07
CaO	5,64
MgO	3,67
Fe ₂ O ₃	0,29
SO ₃	0,16
K ₂ O	0,16
CuO	0,01
SrO	0,01
PF	11,81

Fonte: Relatório técnico CTGAS-ER

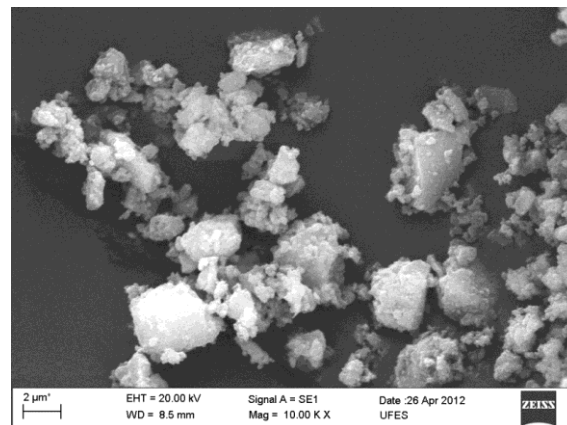
A Figura 3.12 mostra o difratograma de raios - X do RVL que foi feita através da técnica de difração de raios-X (DRX) utilizando o equipamento XRD 6000 da Shimadzu no Laboratório de Materiais Carbonosos e Cerâmicos do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo. Na Figura 3.13 pode ser observada a imagem do RVL obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Figura 3.12 - Difratograma de raios X do RVL



Fonte: Acervo pessoal

Figura 3.13- Micrografia obtida por MEV das partícula de RVL com ampliação de 10000X



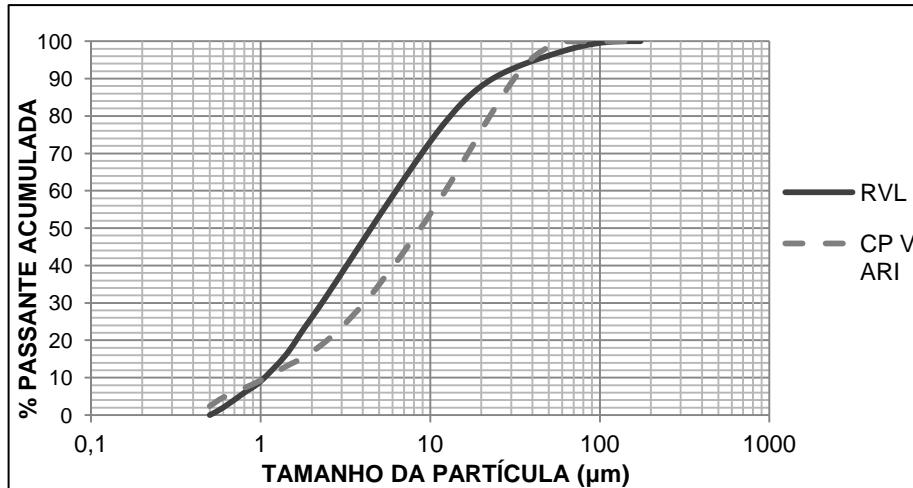
Fonte: Acervo pessoal

Por meio do difratograma apresentado na Figura 3.12 é possível observar que o RVL está, predominantemente, no estado amorfo e por ter um alto teor de sílica este resíduo é um material potencialmente pozolânico.

Através da imagem obtida por MEV na Figura 3.13 pode-se visualizar o formato das partículas do RVL que se apresentam com muitas faces, tornando a partícula bastante angulosa.

A fim de comparar as propriedades do cimento com o resíduo de vidro, na Figura 3.14 é apresentada a sobreposição das curvas granulométricas desses dois materiais e na Tabela 3.8 um resumo das outras características.

Figura 3.14 - Comparação das curvas de granulometria do RVL e do cimento CPV ARI



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 3.8 – Comparação das propriedades do RVL e do cimento

Propriedade	Resíduo de Vidro	Cimento
Massa específica (g/cm ³)	2,31	2,93
Superfície específica (cm ² /g)	9.051	4.782
SiO ₂ (%)	56,77	19,21
Na ₂ O (%)	15,41	-
Al ₂ O ₃ (%)	6,07	5,15
CaO (%)	5,64	63,58
MgO (%)	3,67	0,79
Fe ₂ O ₃ (%)	0,29	2,90
SO ₃ (%)	0,16	2,83
K ₂ O (%)	0,16	0,80
CuO (%)	0,01	-
SrO (%)	0,01	-
PF (%)	11,81	3,76

Fonte: Acervo pessoal

Ao comparar as curvas granulométricas do RVL com a do cimento (Figura 3.14), constata-se uma boa distribuição granulométrica dos dois materiais e a princípio a granulometria do RVL não apresenta restrição para que o resíduo seja utilizado como substituto do cimento.

Através dos resultados de determinação da superfície específica, confirmou-se que o RVL é bem mais fino do que o cimento uma vez que a superfície específica do RVL é maior do que a do cimento. Segundo Tiboni (2007) quanto maior for a superfície específica em contato com a

água, mais rapidamente ocorrerá a hidratação do cimento e maior será a quantidade de aditivo para se alcançar a mesma trabalhabilidade. Dessa forma, os resultados da superfície específica obtida para o resíduo poderá influenciar na velocidade de hidratação e trabalhabilidade dos concretos preparados com a substituição do cimento pelo resíduo.

No que se refere aos resultados da massa específica, verificou-se que o cimento possui um valor maior do que a massa específica do resíduo de vidro laminado. Já que as massas específicas são distintas, foi necessário considerar essa diferença para o cálculo do consumo dos dois materiais no preparo das misturas baseados no valor de suas respectivas massas específicas.

A composição química do resíduo de vidro apresentada ratificou o que outros pesquisadores verificaram em seus estudos, apresentando em sua maior parte a sílica e um elevado teor álcalis (Na_2O).

3.3 Preparação das misturas e ensaios

No primeiro momento foram realizadas as caracterizações dos materiais e dosagem experimental do concreto. Em seguida foram preparados os concretos com as substituições citadas para a realização dos ensaios no estado fresco e no estado endurecido de forma que seus resultados pudessem ser analisados.

No intuito de verificar a pozolanicidade do resíduo de vidro laminado, foram realizados os ensaios regulamentados pela NBR 5751 (ABNT, 1992) e NBR 5752 (ABNT, 1992), ambos baseados na resistência à compressão das argamassas, de forma a verificar se os resultados obtidos para esse resíduo estavam em conformidade com os valores mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992).

Para a determinação do índice de atividade pozolânica com cal, foram moldados três corpos de prova, os quais foram submetidos à cura nos próprios moldes durante sete dias, sendo que, durante as primeiras 24h eles permaneceram a uma temperatura de $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ e durante as 144h posteriores os corpos de prova foram mantidos a uma temperatura de $(55\pm 2)^\circ\text{C}$ até 4h antes do ensaio de ruptura à compressão conforme determina a NBR 5751 (ABNT, 1992). A cal utilizada foi a CH I com massa específica igual a $2,23\text{g/cm}^3$. A NBR 12653 (ABNT, 1992)

estabelece que a resistência à compressão dos corpos de prova devem atingir, aos sete dias, um valor igual ou superior a 6,00 MPa para que o material seja considerado pozolânico.

O índice de atividade pozolânica com cimento foi determinado conforme a NBR 5752 (ABNT, 1992). Para a determinação desse índice foram preparadas duas argamassas, sendo uma de referência (sem substituição de resíduo de vidro laminado) e outra com 35% em volume de substituição do cimento pelo material pozolânico. As quantidades de materiais necessários para a preparação das argamassas seguem na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Proporção de materiais para moldagem dos corpos de prova

Material	Massa necessária (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland	312	202,8
Material Pozolânico	-	82,71
Areia Normal	936	936
Água	159,63	159,69

Fonte: acervo pessoal

O cimento utilizado para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi o CPV ARI. Apesar de a norma NBR 5752 (ABNT, 1992) determinar o uso do cimento CP I, não foi possível utilizar esse tipo de cimento, pois o mesmo não se encontra disponível com facilidade no mercado. Dessa forma, foi escolhido o CPV ARI para substituí-lo, por ser o tipo de cimento com menor teor de adições.

As rupturas dos corpos de prova foram realizadas aos 28 dias conforme orienta a NBR 5752 (ABNT, 1992). Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992) para as amostras de resíduo de vidro laminado ser consideradas materiais pozolânicos por esse ensaio, as mesmas devem apresentar índice de atividade pozolânica maior que 75%. Este índice é a relação entre a resistência dos corpos de prova com adição (argamassa B) e a resistência dos corpos de prova de controle (argamassa A).

O estudo de dosagem experimental dos concretos foi baseado no Método do Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992). Com esse estudo foram elaborados gráficos em que estão correlacionados os valores de resistência à compressão axial e proporção de materiais envolvidos no estudo. A partir desses gráficos foi definido o traço unitário em massa de 1:1,96:2,63 (cimento; areia; brita) com relação água/aglomerante (a/agl) de 0,53. Para esse traço, a resistência aos 28 dias do concreto foi projetada para ser de 40 MPa.

Uma vez que a massa específica do cimento é diferente da massa específica do resíduo de vidro, foi necessário calcular a quantidade de massa de resíduo a utilizar de forma que não houvesse diferença no volume de aglomerante na mistura e conseqüentemente variação no volume total do concreto. Para isso, usou-se a Equação 3.1 na determinação da massa de resíduo de vidro a utilizar.

$$M_{residuo} = M_{cimento} \times \frac{\gamma_{residuo}}{\gamma_{cimento}}; \quad \text{Equação 3.1}$$

Em que:

$$\begin{array}{l} M_{residuo} = \text{massa do resíduo, em kg} \\ M_{cimento} = \text{massa do cimento, em kg} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \gamma_{residuo} = \text{massa específica do resíduo, em kg/dm}^3 \\ \gamma_{cimento} = \text{massa específica do cimento, em kg/dm}^3 \end{array} \right.$$

Foram preparadas amostras de concreto sem adição de resíduo de vidro laminado (concreto referência) e amostras com substituição parcial do cimento pelo resíduo nas proporções de 5, 10 e 15% em massa. As porcentagens e idades de realização dos ensaios foram definidas em função da revisão bibliográfica realizada, a qual mostrou que não é viável a utilização de porcentagens elevadas de substituição do cimento por resíduo de vidro laminado, e que em idades mais avançadas, o concreto com o resíduo tende a obter ganhos na sua resistência. Foram adotadas nomenclaturas específicas para cada traço de concreto produzido que se encontram listadas na Tabela 3.10, juntamente com a composição em massa das misturas.

Tabela 3.10 - Nomenclatura dos traços moldados de acordo com os percentuais de substituições em massa do cimento pelo resíduo e composição em massa das misturas

Descrição	Identificação	Cimento	Areia	Brita	RVL	a/agl	Consumo de cimento (Kg/m ³)
Traço referência	REF	1	1,96	2,63	-	0,53	388,24
Traço com 5% de substituição	RV5	0,95	1,96	2,63	0,03942	0,53	368,82
Traço com 10% de substituição	RV10	0,90	1,96	2,63	0,07884	0,53	349,42
Traço com 15% de substituição	RV15	0,85	1,96	2,63	0,11826	0,53	330,00

Fonte: Acervo pessoal

Os concretos produzidos de acordo com a dosagem estabelecida foram caracterizados nos estados fresco e endurecido. No estado fresco foram realizados ensaios de determinação de índice de consistência e massa específica. Já no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de

elasticidade à compressão e análise da microestrutura do concreto através de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente a fim de definir a influência dos fatores constantes e controláveis envolvidos na pesquisa e a interação entre os mesmos.

Para a preparação dos traços de concretos foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado (*Mecânica Alfa S/A*), com capacidade de 350 litros. A sequência de colocação dos materiais na betoneira se manteve constante para que fosse evitada a perda do material e a mistura ficasse mais homogênea.

O primeiro passo era a execução da imprimação da betoneira para garantir que todo o material necessário para o concreto não ficasse aderido às paredes do equipamento. Logo após esse passo, era acrescentada toda a brita e parte da água. Após esse momento era acrescentado o cimento, feito a mistura por ± 1 minuto onde já era possível verificar que o mesmo envolvia completamente os grãos da brita (Figura 3.15- a).

Figura 3.15 - Aspectos das concretagens realizadas

(a) Argamassa envolvendo completamente os grãos da brita



(b) Aspecto liso da massa de concreto após homogeneização demonstrando boa trabalhabilidade



Fonte: Acervo pessoal

Nos traços em que havia as substituições, o resíduo era colocado na betoneira juntamente com o cimento. Em seguida era acrescentada a areia, seguindo-se do acréscimo do restante de água em intervalos para que a homogeneização fosse mais eficaz. Ao final de todas as concretagens foi verificado um aspecto liso e bem homogêneo conforme mostra a Figura 3.15 - b.

Logo após a preparação dos traços de concreto iniciavam-se as moldagens dos corpos de prova em formas cilíndricas de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro segundo a NBR 5738 (ABNT, 2003) e que pode ser visualizada na Figura 3.16. Esses corpos de prova foram

submetidos aos ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão.

Figura 3.16 - Preparação dos corpos de prova



Fonte: Acervo pessoal

Os corpos de prova foram desmoldados em um período de 24h e depois identificados para armazenagem na câmara úmida. Para garantia da umidade necessária para a cura dos corpos de prova, os mesmos foram mantidos imersos em água saturada com cal dentro da câmara úmida até a data pré-determinada de realização dos ensaios.

Os corpos de prova que foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade tiveram suas faces de trabalho retificadas para evitar irregularidades na superfície, havendo assim, uma melhor distribuição da carga durante o ensaio.

3.3.1 Ensaios no concreto no estado fresco

Após o término da mistura na betoneira foram coletadas amostras para os ensaios de consistência através da medida do abatimento do tronco de cone e massa específica.

O ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizado conforme orienta a NBR NM 67 (ABNT, 1996) e a consistência adotada foi a S100 classificada conforme a NBR 8953 (ABNT, 2009) na qual a faixa de consistência vai de 100 a 160mm (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 – Classes de consistência segundo a NBR 8953 (ABNT, 2009)

Classe	Abatimento (mm)
S10	$10 \leq A \leq 50$
S50	$50 \leq A \leq 100$
S100	$100 \leq A \leq 160$
S160	$160 \leq A \leq 220$
S220	$A \geq 220$

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2009)

Já o ensaio de determinação da massa específica foi realizado de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2009).

3.3.2 Ensaios no concreto no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios mecânicos de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão. Para apreciação morfológica foi realizada uma análise microestrutural (microscopia eletrônica de varredura).

Os corpos de prova foram mantidos até a data do ensaio imersos em tanques com água saturada com cal, atendendo as prescrições estabelecidas pelas normas brasileiras.

3.3.2.1 Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com o auxílio de uma prensa *Amsler* de mostrador analógico (Figura 3.17), pertencente ao Laboratório de Materiais de Construção (LEMAC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Figura 3.17 - Prensa utilizada no ensaio de resistência à compressão



Fonte: acervo pessoal

Para cada traço e cada idade, foram testados 6 corpos de prova sendo as idades de ensaios de 3, 7, 28 e 91 dias conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). Já aos 270 dias foi testado um corpo de prova para cada traço referente aos corpos de prova reservas do planejamento experimental.

3.3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os testes de resistência à tração por compressão diametral também foram realizados em uma prensa *Amsler* de mostrador analógico no LEMAC-UFES. Foi testada a resistência à tração por compressão diametral de 6 corpos de prova em cada idade de 3, 7 e 28 dias para todos os traços segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011).

3.3.2.3 Módulo estático de elasticidade à compressão

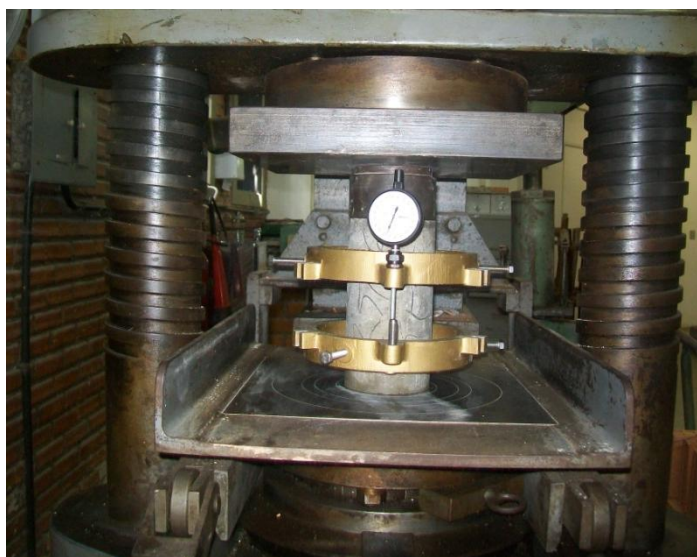
O ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão foi realizado no LEMAC-UFES com a mesma prensa utilizada para os ensaios de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Foram testados 6 corpos de prova para cada idade de 7 e 28 dias para todos os traços.

Os corpos de provas cilíndricos possuíam dimensões de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro. Logo, o ensaio foi adaptado, pois a NBR 8522 (ABNT, 2003) recomenda o uso de

corpos de prova com 30 cm de altura por 15 cm de diâmetro para este ensaio ou outra dimensão de forma que a proporção comprimento/diâmetro atenda à condição de que $L/d=2$.

Além da prensa, foram utilizados dois medidores de deformações mecânicos fixados de forma que os pontos de medição fiquem equidistantes dos extremos do corpo de prova. A Figura 3.18 mostra o aparato montado para o ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão.

Figura 3.18 - Aparato para o ensaio de módulo de elasticidade



Fonte: acervo pessoal

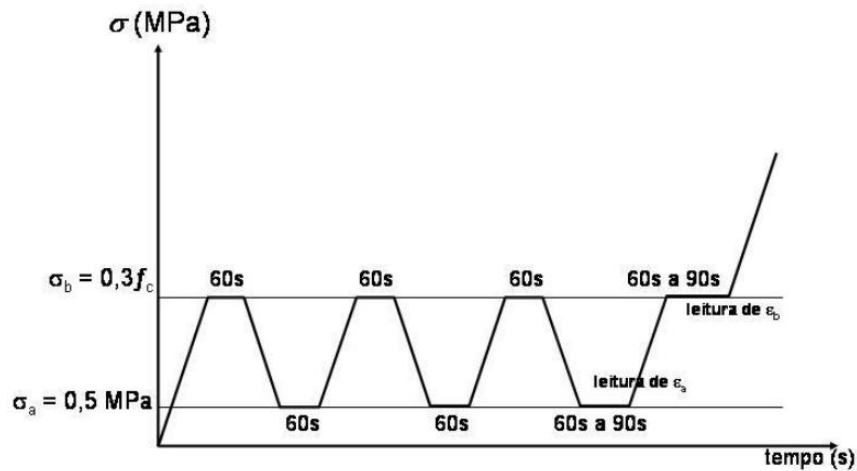
Para a execução do ensaio foi necessário preparar o plano de carga a partir da média das leituras dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial. Dessa forma, o ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão só podia ser realizado após o ensaio de resistência à compressão de cada traço na idade programada.

Definida a resistência média à compressão dos corpos de prova ensaiados, as cargas a serem aplicadas no ensaio de módulo estático de elasticidade à compressão foram de 30% da média calculada ($0,3f_c$) e também 0,5 MPa (393 kgf), máxima e mínima respectivamente.

Após o corpo de prova ser posicionado na prensa, foi aplicado o carregamento de forma a alcançar a tensão aproximada de $0,3f_c$ mantendo por 60 segundos e efetuando a leitura no medidor logo após esse período. Em seguida, a carga foi reduzida para 393 kgf (nível de tensão básica) sendo que após 60 segundos realizou-se novamente a leitura da deformação no medidor. Foram executados quatro ciclos para a tensão máxima e três ciclos para a tensão

básica conforme ilustrado pela Figura 3.19. Após a conclusão dos ciclos retirou-se o aparato do corpo de prova (Figura 3.18), e o mesmo foi rompido por compressão axial.

Figura 3.19 - Representação esquemática do carregamento para determinação do módulo de elasticidade



Fonte: NBR 8522 (ABNT, 2003)

O módulo de elasticidade, E_{ci} , em GPa, é dado pela Equação 3.2.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-3} = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3} \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

σ_b é a tensão maior, em megapascals ($\sigma_b = 0,3f_c$);

σ_a é a tensão básica, em megapascals ($\sigma_a = 0,5 \text{ MPa}$);

ε_b é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

ε_a é a deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

As deformações são calculadas por meio da Equação 3.3.

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_f}{2l_0} \quad \text{Equação 3.3}$$

Onde,

ε_f é a última deformação lida de cada uma das tensões;

l_0 é a distancia entre os eixos dos anéis (9cm).

3.3.2.4 Análise microestrutural

A estrutura do concreto é muito heterogênea e complexa, sendo assim é bastante difícil correlacionar o comportamento desse material a modelos matemáticos exatos. Diferente de outros materiais de construção, a estrutura do concreto não permanece estável, isso porque a pasta e a zona de transição se modificam com o tempo, a umidade e a temperatura. Porém, o conhecimento da sua estrutura e das propriedades de cada material que o compõe é essencial para o entendimento e controle das propriedades do material composto.

Para a verificação dos possíveis efeitos ocasionados nas matrizes cimentícias devido à substituição do cimento pelo resíduo de vidro laminado, as amostras de concretos 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* (Figura 3.19).

Figura 3.20 - Equipamento utilizado para realizar as microscopias



Fonte: acervo pessoal

As amostras utilizadas para esse ensaio foram extraídas dos corpos de prova submetidos ao ensaio de resistência à compressão, sendo coletadas aleatoriamente entre as seis unidades ensaiadas nas idades de 28, 91 e 270 dias. Como para a realização desse ensaio era necessário amostras bem pequenas (± 2 cm), às vezes não era possível encontrar nos corpos de prova rompidos fragmentos nessas dimensões, dessa forma as amostras eram diminuídas manualmente. As amostras foram selecionadas de forma que a zona de transição entre o agregado e a pasta pudesse ser analisada.

Todo o processo de preparo das amostras para análise microestrutural foi realizado no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo.

Após a seleção das amostras, as mesmas foram metalizadas. Nesse processo as superfícies foram recobertas uniformemente com uma película de ouro para que pudessem ser observadas ao MEV conforme pode ser visualizado na Figura 3.21.

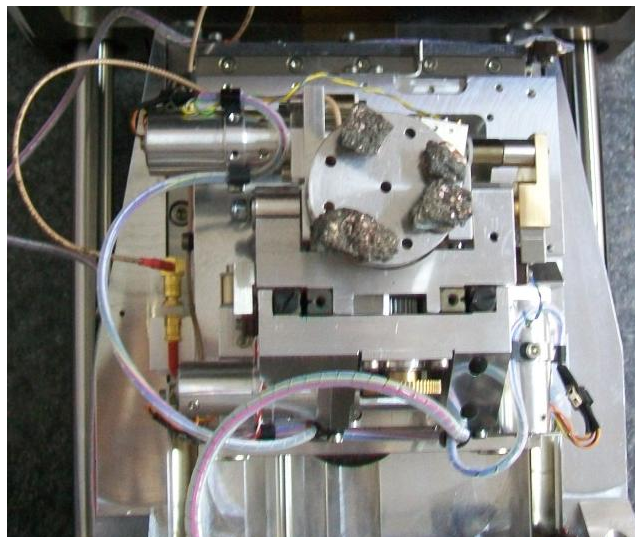
Figura 3.21 - Metalização das amostras



Fonte: acervo pessoal

Após a metalização das superfícies, as amostras foram inseridas no porta-amostra e em seguida foi inserido no MEV (Figura 3.22). 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 3.22 - Amostras metalizadas inseridas no MEV para análises



Fonte: acervo pessoal

3.3.2.5 Métodos estatísticos

Os resultados dos ensaios do concreto no estado endurecido, exceto as imagens de microscopia, foram submetidos a uma análise estatística. Foi verificada a significância do efeito de cada uma das variáveis através da análise de variância (ANOVA).

O efeito de um fator controlável sobre as variáveis respostas é determinado por um teste de comparação entre valores calculados ($F_{\text{calculado}}$) e os valores Tabelados (F_{tabelado}) de uma função de distribuição de probabilidade de Fisher. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o $F_{\text{calculado}}$ for maior do que o F_{tabelado} . O nível de significância adotado nas análises foi de 5%. As análises foram realizadas com o auxílio do *software* Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

Quando aplicação da análise de variância conduz à evidência de que existem diferenças significativas entre os resultados avaliados, é possível investigar onde se encontram as diferenças possíveis entre as médias analisadas. Existem vários testes que conseguem identificar essas diferenças como teste de Tukey, teste de Fisher, teste de Bonferroni e outros.

Nessa pesquisa optou-se por realizar o método de Comparação Múltipla de Médias (CMM) segundo orienta Ribeiro e Caten (2011). Para isso é necessário avaliar primeiramente quais são os fatores significativos, inclusive a interação entre eles, para posteriormente aplicar o método. Para a decisão da existência de diferença significativa entre as médias, é calculado o desvio padrão das médias e o limite de decisão conforme as equações 3.4 e 3.5.

$$S_y = \sqrt{\frac{MQR}{n}} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$L_d = 3 \times S_y \quad \text{Equação 3.5}$$

Onde,

S_y : Desvio padrão das médias

MQR : Média quadrada do erro na análise de variância

n : Graus de liberdade da interação

L_d : Limite de decisão

Calculado o limite de decisão, dispõem-se as médias em ordem crescente e calculam-se as diferenças entre elas, duas a duas. Caso a diferença seja superior ao limite de decisão, a diferença é significativa e caso contrário as duas pertencem ao mesmo grupo.

Os resultados foram analisados e discutidos, para que se chegasse a uma conclusão em torno da viabilidade de utilização do resíduo de vidro laminado como substituto parcial do cimento Portland CPV ARI em concretos com fins estruturais, tendo sido fixado o valor de 40 MPa como referência para a comparação dos resultados de resistência à compressão axial.

Capítulo 4

Resultados e discussões

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No capítulo 3 foram apresentados os procedimentos experimentais do trabalho, incluindo a amostragem dos materiais a serem utilizados para a preparação das misturas de concreto, caracterização física e química, dosagem experimental e ensaios mecânicos nos concretos produzidos.

Foi estabelecida a dosagem do concreto e os percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro laminado (0, 5, 10 e 15%), para o preparo dos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios propostos. A metodologia de análise dos resultados também foi definida no capítulo 3.

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios do programa experimental que são tratados separadamente, para ensaios realizados no resíduo de vidro laminado para verificação da pozolanicidade, ensaios realizados no concreto no estado fresco e no estado endurecido.

4.1 Pozolanicidade do resíduo de vidro laminado

A NBR 12653 – Materiais Pozolânicos – Especificação (ABNT, 1992) apresenta exigências químicas e físicas mínimas para a classificação de um material pozolânico. Dessa forma para a verificação da pozolanicidade do resíduo foram realizados os ensaios determinados pelas normas NBR 5751 - Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal (ABNT, 1992) e NBR 5752 – Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com cimento (ABNT, 1992) para verificação das exigências físicas. Para a verificação das exigências químicas foi realizado a espectrofotometria e fluorescência de raios-X para obter a composição química do material.

A NBR 12653 (ABNT, 1992) define como pozolana um material silicoso ou sílico-aluminoso que sozinho possui pouco ou nenhum valor cimentício. Entretanto, quando dividido finamente e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentícias. O material deve estar finamente moído para que o material silicoso possa combinar com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar silicatos estáveis. A sílica deve estar no estado amorfo, isto é vítreo, pois quando apresenta estrutura cristalina sua reatividade é muito pequena. No capítulo 3 foi apresentado o difratograma de raios X do RVL no qual é possível constatar o estado amorfo do resíduo.

A reação pozolânica entre o hidróxido de cálcio e a sílica amorfa, resultando em silicato de cálcio hidratado, pode ser expressa de acordo a reação abaixo (MEHTA e MONTEIRO, 2008):



onde,

CH: hidróxido de cálcio;

H: H₂O (água);

C-S-H: silicato de cálcio hidratado

A Tabela 4.1 apresenta uma comparação das propriedades químicas do resíduo de vidro laminado e dos limites estabelecidos para as classes de materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992). Através dessa análise, o resíduo de vidro pode ser classificado

como classe E, porém não atende aos requisitos de perda ao fogo, teor de álcalis disponíveis em Na_2O e teor de umidade. É perceptível que a porcentagem de perda ao fogo obtida foi alta quando comparado aos limites para materiais pozolânicos, e, isso pode ser devido à presença do PVB na composição do resíduo. O teor de umidade se apresentou um pouco acima do limite estabelecido, pois por se tratar de um material muito fino absorve a umidade do ambiente com muita facilidade.

Tabela 4.1 - Comparação dos requisitos químicos mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992)

Propriedades	Classes do material pozolânico			Resíduo de vidro laminado
	N	C	E	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, % mín	70	70	50	63,13
SO_3 , % máx	4,0	5,0	5,0	0,16
Teor de umidade, % máx	3,0	3,0	3,0	3,77
Perda ao fogo, % máx	10,0	6,0	6,0	11,81
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx	1,5	1,5	1,5	15,41

Nota:

N = Pozolanas naturais e artificiais.

C = Cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.

E = Qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 1992)

Matos e Sousa-Coutinho (2012) e Shao *et al.* (2000) verificaram que o teor de álcalis (Na_2O) nos resíduos de sua pesquisa também apresentou-se acima dos limites estabelecidos nas normas para materiais pozolânicos. Matos e Sousa-Coutinho (2012) verificaram que apesar do teor alcalino elevado, a expansão álcali-sílica (RAS) foi drasticamente reduzida, pois o consumo de álcali na estrutura de gel C-S-H, durante a reação pozolânica, ocorre antes que a RAS, não deixando álcalis suficientes para induzir esta reação.

Os resultados dos ensaios físicos estipulados na NBR 12653 (ABNT, 1992) serão apresentados nas seções 4.1.1 e 4.1.2 para melhor compreensão. O cimento utilizado para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento Portland foi o CPV ARI. Apesar da norma NBR 5752 (ABNT, 1992) determinar o uso do cimento CP I, não foi possível utilizar esse tipo de cimento, pois o mesmo não se encontra disponível no mercado com facilidade. Dessa forma, foi escolhido o CPV ARI para substituí-lo por ser o tipo de cimento com menor teor de adições. A Cal utilizada para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cal, foi a CH I, conforme determinada pela norma NBR 5751 (ABNT, 1992) com massa específica igual a $2,23\text{g/cm}^3$.

4.1.1 Índice de atividade pozolânica com cal (IAP-cal)

Os procedimentos para preparação da argamassa seguiram o que foi determinado pela NBR 5751 (ABNT, 1992). Os resultados desse ensaio encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores de resistência à compressão axial para verificação do IAP-cal

Identificação	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	Massa específica do RVL (g/cm ³)	Área específica do RVL (cm ² /g)
CP1-CAL	5,05				
CP2-CAL	4,46	4,47	5,77	2,31	9051
CP3-CAL	4,81				

Fonte: Acervo pessoal

A norma NBR 12653 (ABNT, 1992) estabelece que a resistência à compressão dos corpos de prova devem atingir, aos sete dias, um valor igual ou superior a 6,00 MPa. Das amostras ensaiadas nenhuma atingiu esse valor. Sendo, portanto, considerado material não pozolânico com cal.

Entretanto, foi verificado que os corpos de prova antes do ensaio de compressão ainda encontravam-se úmidos conforme mostra a Figura 4.1. A cal utilizada para a execução desse ensaio pode ter influenciado negativamente nos resultados. Segundo Weber (2001) devido à variação da qualidade da cal, e seus efeitos no resultado do teste, a maioria dos pesquisadores não mais utiliza este ensaio.

Figura 4.1 – Corpos de prova úmidos aos sete dias



Fonte: acervo pessoal

4.1.2 Índice de atividade pozolânica com cimento (IAP-cim)

Para execução desse ensaio foram preparadas duas argamassas, sendo uma de referência (cimento, areia e água) e outra argamassa com 35% de substituição, em volume, do cimento pelo material pozolânico conforme regulamenta a NBR 5752 (ABNT, 1992). A consistência

da argamassa, medida na mesa de consistência (flow table), foi controlada pela adição de água de forma a ficar compreendida entre (225 ± 5) mm. As quantidades de materiais necessários para a preparação das argamassas seguem na Tabela 4.3.

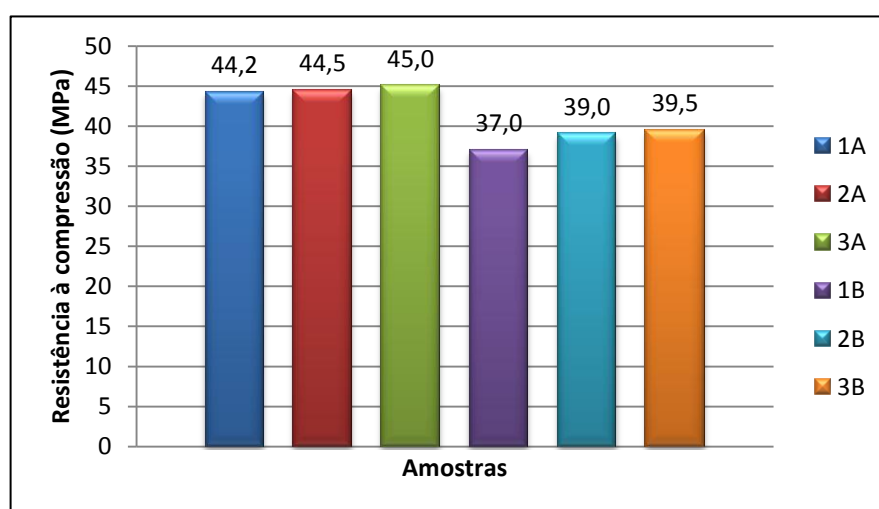
Tabela 4.3 - Proporção de materiais para moldagem dos corpos de prova

Material	Massa necessária (g)	
	Argamassa A	Argamassa B
Cimento Portland	312	202,8
Material pozolânico (Resíduo de vidro laminado)	-	82,71
Areia Normal	936	936
Água	159,63	159,69

Fonte: acervo pessoal

As rupturas dos corpos de prova foram realizadas aos 28 dias e os resultados são mostrados na Figura 4.2. Foram preparados seis corpos de prova, sendo três unidades referentes à argamassa A, argamassa de referência (1A, 2A e 3A) e três unidades referentes à argamassa B, argamassa com resíduo (1B, 2B e 3B).

Figura 4.2 - Resistência à compressão para verificação do IAP-cim



Fonte: acervo virtual

Os valores médios das resistências à compressão bem como o índice de atividade pozolânica das amostras ensaiadas encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio de Pozolanicidade com cimento Portland

Amostra	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	Índice de atividade Pozolânica (%)	Água Requerida (%)	Água (g)
Argamassa A	44,6	0,93	-	-	159,63
Argamassa B	38,5	3,9	86,36	100,04	159,69

Fonte: acervo pessoal

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992) para as amostras de resíduo de vidro laminado serem consideradas materiais pozolânicos pelo ensaio de IAP-cim, as mesmas devem apresentar índice de atividade pozolânica superior a 75%. Este índice é a relação entre a resistência dos corpos de prova com o resíduo e a resistência dos corpos de prova de controle. Conforme o resultado apresentado na Tabela 4.4 confirma-se a pozolanicidade do resíduo através desse ensaio, com cimento Portland.

A diferença de consumo de água para preparação das duas argamassas foi mínima. Dessa forma a quantidade de água não foi responsável pela diferença das resistências médias das argamassas produzidas.

4.2 Análise dos ensaios realizados no concreto

4.2.1 Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco

4.2.1.1 Análise da 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, 1996) e classificados conforme NBR 8953 (ABNT, 2009), estão expostos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone

Traço	Índice de consistência obtido (mm)	Classe	Abatimento (mm)
REF	120		
RV5	120	S100	$100 \leq A \leq 160$
RV 10	90		
RV 15	100		

Fonte: acervo pessoal

A partir da Tabela 4.5, pode ser notada uma ligeira diminuição no índice de consistência das amostras, porém todas as misturas foram consideradas trabalháveis, apresentando um aspecto

coesão, plástico e dentro da classe de consistência determinada. Esses resultados corroboram com as pesquisas de Antônio (2012) e Shayan e Xu (2006).

Os materiais com elevada superfície específica tendem a prejudicar a homogeneização da mistura, devido à dificuldade de passagem da água. Segundo Mehta e Monteiro (2008) concretos que possuam uma proporção muito alta de um cimento fino apresentam excelente coesão o que pode justificar a diminuição do abatimento para as misturas com maior teor de resíduo de vidro laminado, uma vez que sua superfície específica é superior a do cimento utilizado na pesquisa.

4.2.1.2 Determinação da massa específica

Os resultados de massa específica dependem basicamente do teor de argamassa e do tipo de agregado que compõem o concreto os quais podem influenciar o módulo de elasticidade do concreto. Os resultados do ensaio de determinação de massa específica no estado fresco, conforme NBR 9833 (ABNT, 2009) estão registrados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados do ensaio de massa específica no estado fresco

Traço	Massa específica (Kg/m ³)
REF	2360
RV5	2362
RV 10	2387
RV 15	2387

Fonte: acervo pessoal

Conforme é mostrado na Tabela 4.6, as misturas com teores de resíduo de vidro apresentaram um incremento no valor da massa específica em relação ao concreto de referência, em especial para os traços RV10 e RV15. Esses resultados vão de encontro aos resultados das pesquisas de Nassar e Soroushian (2012), Shayan e Shu (2006), Taha e Nounu (2008) e outros, uma vez que nessas pesquisas houve uma diminuição da densidade do concreto com o aumento do teor de resíduo de vidro em função da diferença de massa específica existente entre o resíduo e o cimento.

4.2.2 Avaliação das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido

A caracterização dos concretos no estado endurecido foi realizada por meio dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade.

4.2.2.1 Resistência à compressão axial

Foram testados seis corpos de prova de cada dosagem para cada idade de 3, 7, 28 e 91 dias e um corpo de prova para a idade de 270 dias de cada dosagem, todos ensaiados conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). Os valores médios de resistência à compressão axial para cada traço podem ser observados na Tabela 4.7.

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

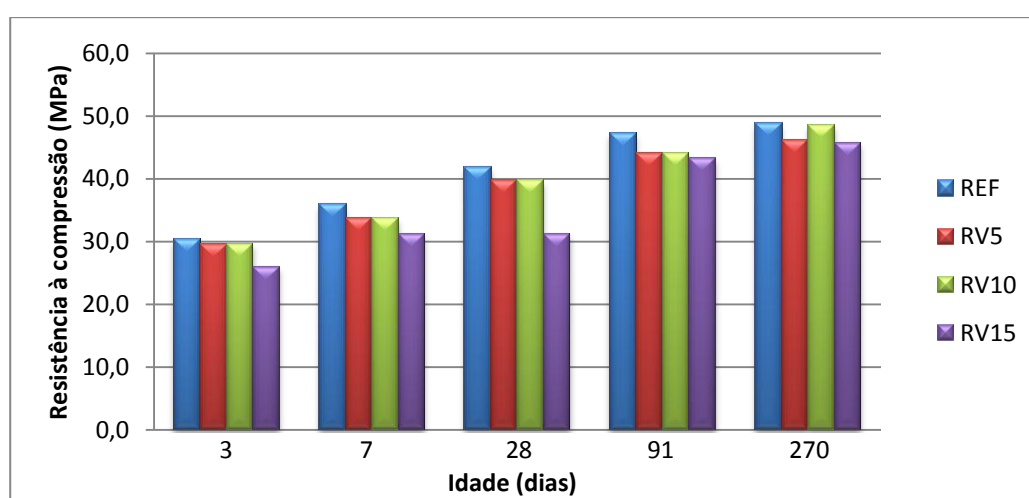
Traço	Idade	Resistência média à compressão axial (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
REF	3	30,3	0,7	2,4
	7	35,9	1,5	4,1
	28	41,8	1,8	4,3
	91	47,2	1,0	2,1
	270	48,9	-	-
RV5	3	29,6	0,6	2,0
	7	33,7	0,5	1,5
	28	39,6	0,6	1,5
	91	44,1	0,6	1,4
	270	46,1	-	-
RV 10	3	26,9	0,6	2,0
	7	31,9	0,6	2,0
	28	39,4	0,3	0,9
	91	44,4	1,3	2,9
	270	48,5	-	-
RV 15	3	25,9	1,1	4,3
	7	31,1	0,7	2,3
	28	31,1	0,7	2,3
	91	43,1	1,1	2,4
	270	45,7	-	-

Fonte: acervo pessoal

Os parâmetros estatísticos e o coeficiente de variação (cv), obtidos para a resistência à compressão confirmam um crescimento dos valores das médias de resistência à compressão com o avanço da idade e a distribuição é concentrada uma vez que o coeficiente de variação das amostras é menor que 10%, o que revela uma uniformidade nos procedimentos de moldagem dos concretos.

A Figura 4.3 representa o gráfico dos resultados médios de resistência à compressão axial dos concretos estudados. Os concretos com substituição do cimento Portland pelo resíduo de vidro laminado obtiveram resultados de resistência inferiores ao concreto de referência. Porém aos 91 dias todos alcançaram a resistência requerida mesmo com o consumo de cimento inferior ao concreto de referência. O consumo de cimento do traço referência é de 388,24 kg/m³ enquanto que para as misturas RV 5, RV 10 e RV 15 são de 368,82 Kg/m³, 349,42 Kg/m³ e 330,00 Kg/m³ respectivamente, o que pode ter contribuído para a redução da resistência nos concretos com resíduo.

Figura 4.3 - Resistência à compressão axial



Fonte: acervo pessoal

A princípio, observa-se que nenhuma das dosagens com percentual de substituição ultrapassou a resistência à compressão do traço de referência e também não atingiu os 40 MPa até os 28 dias. Porém, houve um crescimento da resistência à compressão à medida que a idade aumentava, de forma que aos 91 dias todos os corpos-de-prova atingiram uma resistência superior aos 40 MPa estabelecidos inicialmente no programa experimental. Segundo Nassar e Soroushian (2012) e Shayan e Xu (2006), esse aumento de resistência tardia pode ser devido ao comportamento pozolânico que o vidro exerce nas misturas fazendo com que o aumento da resistência seja evidenciado em idades mais avançadas.

Os resultados obtidos para as idades de 3, 7, 28 e 91 dias foram submetidos a uma análise de variâncias (ANOVA) a fim de comparar a influencia de cada um dos fatores controláveis sobre a resistência à compressão. Os quatro corpos de prova reservas foram rompidos na idade de 270 dias, porém os resultados obtidos para essas unidades não foram incluídos na análise estatística uma vez que o número de corpos de prova foi insuficiente. Essa análise

constatou que o modelo fatorial adotado é significativo, já que os valores de F_{cal} de cada variável foram maiores que os valores de F_{tab} respectivo, conforme mostra a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - ANOVA do efeito da idade e do percentual de resíduo sobre a resistência à compressão

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F_{cal}	F_{tab}	p-valor	Resultado
Idade (dias)	3458,5	3	1152,1	1384,2	2,71	0,00	Significativo
%Substituição	416,8	3	138,9	166,9	2,71	0,00	Significativo
Idade (dias) x %Substituição	167,7	9	18,6	22,4	1,99	0,00	Significativo
Erro	64,5	77	0,8				

Nota

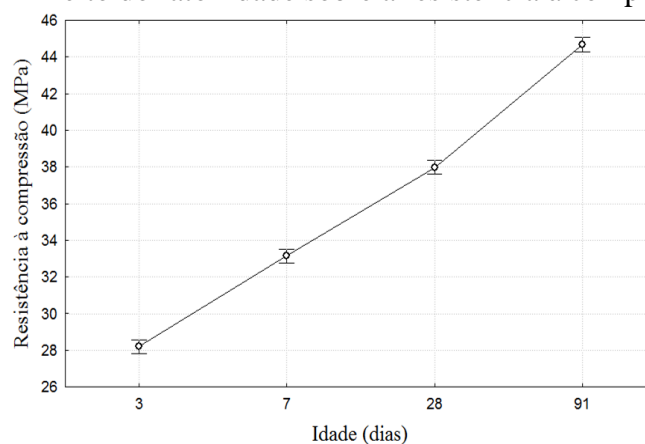
SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Fonte: acervo pessoal

No que se refere à intensidade de influência dos fatores, pode-se constatar a partir dos valores de F_{cal} (Tabela 4.8), que a variável mais influente na resistência à compressão axial foi o fator idade, sendo o percentual de substituição de influência secundária e a interação dos fatores controláveis, o fator de menor influencia. Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são representados os efeitos dos fatores de variação sobre a resistência a compressão.

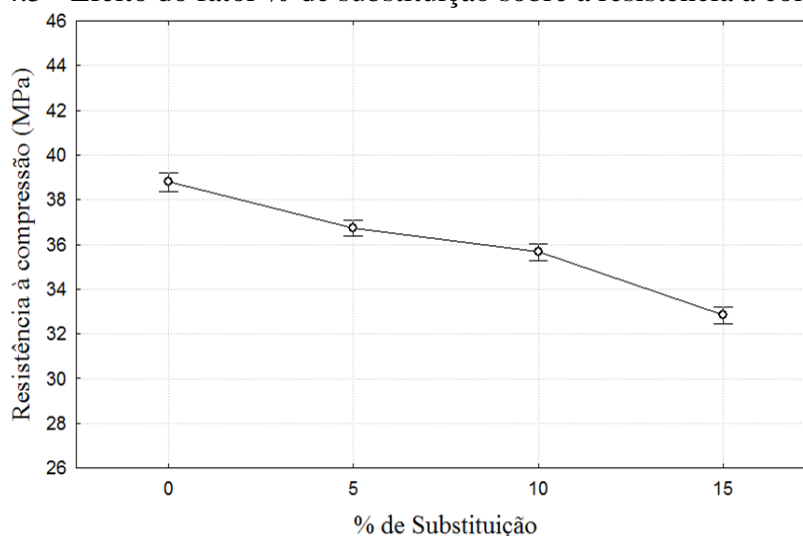
Figura 4.4 - Efeito do fator idade sobre a resistência à compressão axial



Fonte: acervo pessoal

A Figura 4.4 mostra que há um aumento da resistência com o aumento da idade, ressaltando que os incrementos de resistências aos 91 dias são consideráveis. Esse resultado foi análogo na pesquisa de Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011), em que as amostras com resíduos analisadas alcançaram resistências próximas à amostra de referência em idades mais avançadas.

Figura 4.5 - Efeito do fator % de substituição sobre a resistência à compressão



Fonte: acervo pessoal

Pela Figura 4.5 é possível observar que à medida que aumenta o percentual de substituição do cimento pelo resíduo, a resistência à compressão diminui. Uma vez que se manteve a mesma relação água/aglomerante para todas as misturas, ao calcular a relação água/cimento (a/c) para cada traço verificou-se essa relação aumentava à medida que acrescia o teor de resíduo na mistura conforme mostra a Tabela 4.9.

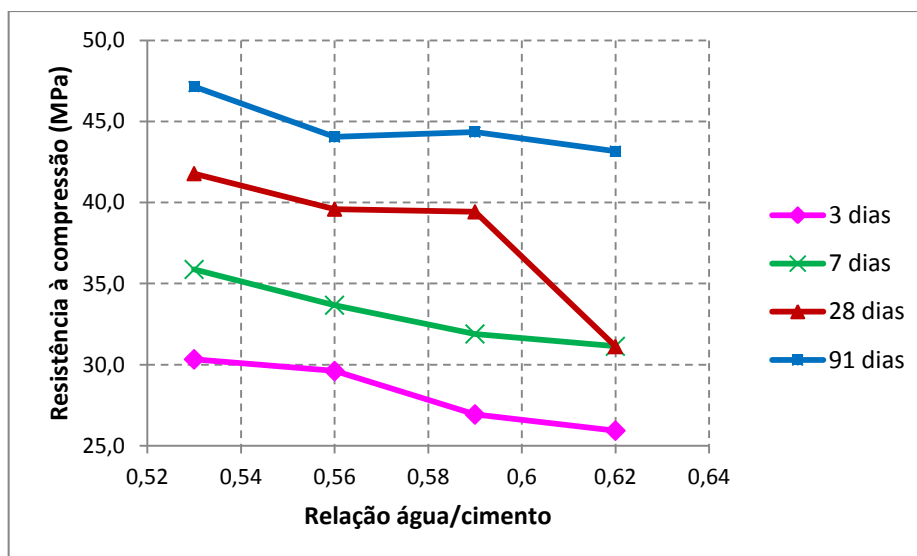
Tabela 4.9 – Relação água/cimento das misturas de concreto

Identificação do traço	Proporção dos materiais para 50kg de cimento (cimento:resíduo:areia:brita:água)	Relação água/aglomerante	Relação água/cimento
REF	50: 0: 98: 131,5: 26,5		0,53
RV 5	47,5: 2,50: 98: 131,5: 26,5	0,53	0,56
RV 10	45: 5: 98: 131,5: 26,5		0,59
RV 15	42,5: 7,5: 98: 131,5: 26,5		0,62

Fonte: acervo pessoal

Através da Figura 4.6 é possível visualizar o comportamento da resistência à compressão dos concretos em função da relação a/c de cada mistura. O aumento da relação a/c pode ter enfraquecido progressivamente a matriz cimentícia em função do aumento da porosidade. Uma vez que a relação água/cimento não se manteve constante, houve uma variação nos resultados da resistência à compressão, que pode ser explicada pela lei de *Abrams da relação água/cimento*. Os efeitos do resíduo de vidro na misturam foram notórios aos 91 dias, uma vez que a resistência à compressão obteve ganhos consideráveis nessa idade.

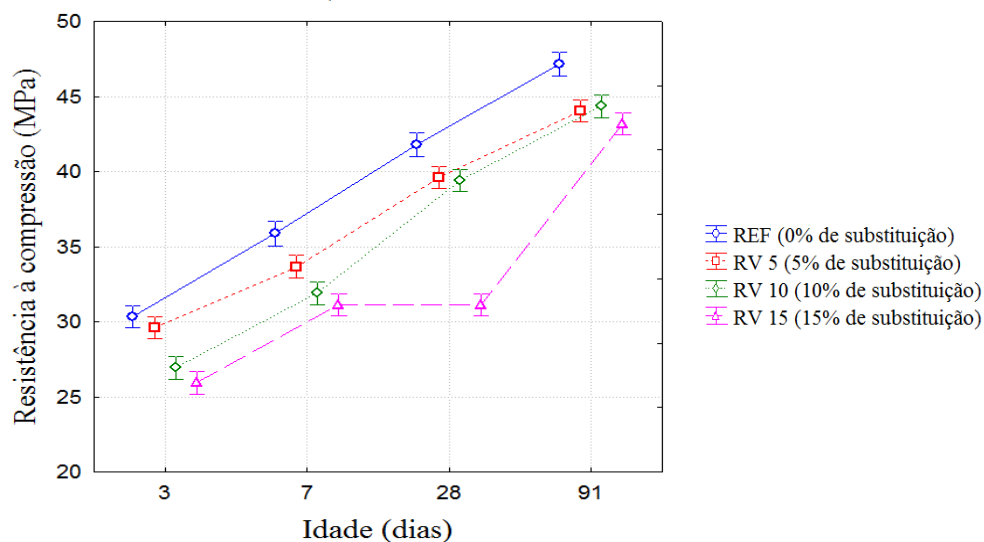
Figura 4.6 – Resistência à compressão em função da relação a/c dos concretos



Fonte: acervo pessoal

A Figura 4.7 apresenta a interação entre os fatores idade e percentual de substituição do concreto sobre a resistência à compressão.

Figura 4.7 - Efeito da interação entre os fatores idade e percentual de substituição sobre a resistência à compressão axial



Fonte: acervo pessoal

É possível visualizar na Figura 4.7 os ganhos na resistência à compressão no decorrer da idade para todas as misturas de concreto, exceto para o traço RV 15 em que se pode destacar um ponto fora da linha de tendência dessa reta. Provavelmente algumas amostras desse traço apresentaram resultados não esperados em função de fatores externos que podem ter influenciado no resultado apresentado.

No intuito de investigar se os valores de resistências médias à compressão diferem entre si, foi realizada a comparação múltipla de médias (CMM). Como a interação do fator idade e do fator percentual de substituição foi significativa, a CMM deve ser feita apenas para a interação.

Tabela 4.10 - Comparação Múltipla de Médias (CMM) dos valores de resistência à compressão axial aos 91 dias

Médias em ordem crescente	Desvio padrão das médias	Limite de decisão	Comparação duas a duas	Resultado	
Identificação	Resistência (MPa)	$L_d=3.S_y$	(4) e (3) → 47,2 - 44,4 = 2,8	Significativo	
(1) RV 15	43,2	$S_y=0,4$	(4) e (2) → 47,2 - 44,1 = 3,1	Significativo	
(2) RV 5	44,1		(4) e (1) → 47,2 - 43,2 = 4,0	Significativo	
(3) RV 10	44,4		$L_d=1,2$	(3) e (2) → 44,4 - 44,1 = 0,3	Não Significativo
(4) REF	47,2		(3) e (1) → 44,4 - 43,2 = 1,2	Não Significativo	
			(2) e (1) → 44,1 - 43,2 = 0,9	Não Significativo	

Nota:

$$S_y = \frac{\sqrt{MQR}}{\sqrt{n}}; \text{ MQR} = \text{Média quadrática dentro do grupo}; n = n^\circ \text{ de repetições}$$

L_d = Limite de decisão

Fonte: acervo pessoal

Na Tabela 4.9, pode ser observado que não há diferença significativa entre os resultados médios de resistência à compressão entre os concretos com substituição do cimento pelo resíduo, pois a diferença entre os valores médios são iguais ou inferiores ao limite de decisão determinado no método da CMM. Já os resultados dos concretos produzidos com resíduo quando comparados com o concreto de referência percebe-se que as diferenças são significativas.

Através dessa comparação, pode-se constatar que a diminuição da resistência média à compressão, verificada nos concretos produzidos com o resíduo de vidro, foi devido à diminuição do consumo de cimento na mistura e ao aumento da relação a/c. Ao comparar o consumo de cimento da mistura de referência com a mistura de maior substituição, verifica-se uma diferença de quase 60 Kg/m³.

4.2.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

Apesar de a maior parte dos elementos de concreto ser projetadas para resistirem às tensões de compressão, as tensões de tração não podem ser ignoradas uma vez que a fissuração do concreto geralmente é resultante de uma ruptura à tração causada por retração restringida. A resistência de um concreto quando submetido a um carregamento à flexão (como em pavimentação de estradas) é determinada por uma combinação das tensões de tração, compressão e cisalhamento (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Dada a importância do conhecimento das tensões de tração, os concretos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral nas idades de 3, 7 e 28 dias conforme as determinações da NBR 7222 (ABNT, 2011). Os resultados médios e o percentual do coeficiente de variação de cada teste estão apresentados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resultados dos valores médios de resistência à tração por compressão diametral

Traço	Idade	Resistência média à tração por compressão diametral (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
REF	3	2,65	0,11	3,94
	7	2,85	0,13	4,50
	28	3,05	0,10	3,13
RV5	3	2,60	0,05	1,80
	7	3,00	0,13	4,24
	28	3,00	0,06	4,24
RV 10	3	2,35	0,09	3,84
	7	2,60	0,12	4,61
	28	3,20	0,11	3,35
RV 15	3	2,30	0,07	2,96
	7	2,40	0,12	4,93
	28	3,10	0,09	2,90

Fonte: acervo pessoal

A análise estatística apresentada na Tabela 4.12 verificou a variância dos resultados obtidos neste ensaio, a fim de comparar a influência da substituição do cimento por resíduo de vidro sobre a resistência à tração por compressão diametral dos concretos. Foi verificada a significância estatística, ao nível de confiança de 95 %, do efeito da variável investigada, por meio da análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.12 - Análise de variância da resistência à tração por compressão diametral

Fatores de variação	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	p-valor	Resultado
Idade (dias)	3,66	2	1,83	178,27	3,14	0,00	Significativo
%Substituição	0,81	3	0,27	26,28	2,75	0,00	Significativo
Idade (dias) x %Substituição	1,00	6	0,17	16,31	2,24	0,00	Significativo
Erro	0,49	48	0,01				

Nota

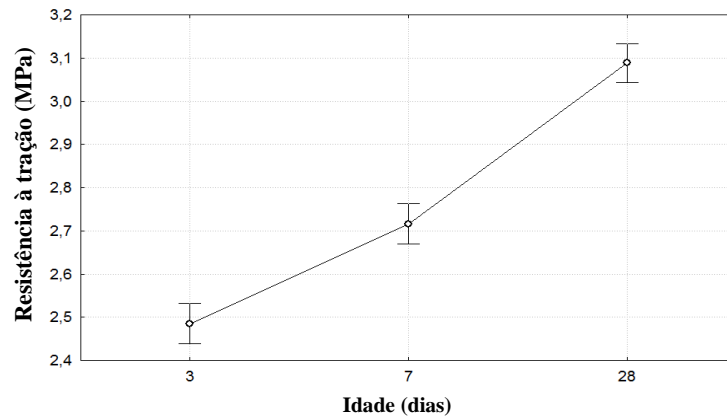
SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática;

F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Fonte: acervo pessoal

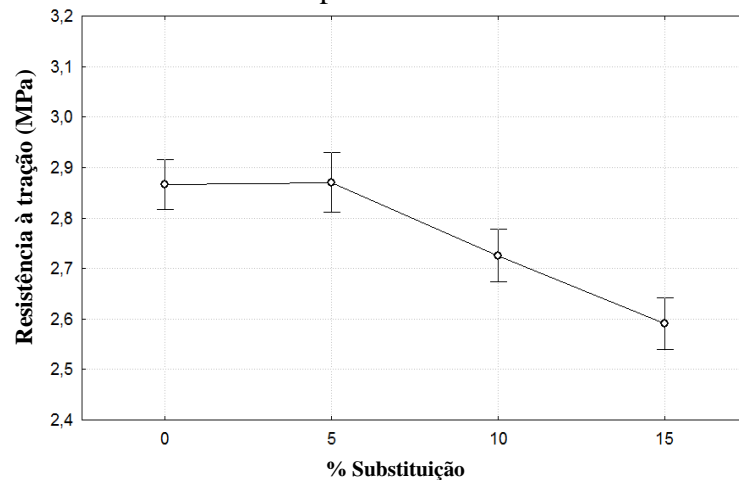
De acordo com o tratamento estatístico realizado, todos os fatores de variação investigados foram significativos, sendo o fator idade o de maior significância. Nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 pode ser observada a influência dos fatores de variação sobre a resistência à tração por compressão diametral.

Figura 4.8 - Efeito do fator idade sobre a resistência à tração por compressão diametral



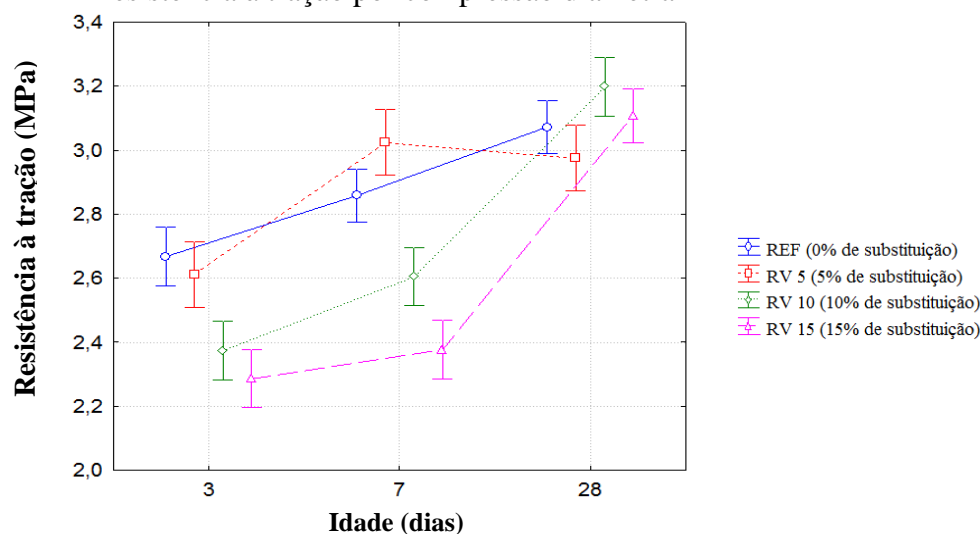
Fonte: acervo pessoal

Figura 4.9 - Efeito do fator percentual de substituição sobre a resistência à tração por compressão diametral



Fonte: acervo pessoal

Figura 4.10 - Efeito da interação entre os fatores idade e percentual de substituição sobre a resistência à tração por compressão diametral



Fonte: acervo pessoal

Segundo Mehta e Monteiro (2008) quando adições minerais são utilizadas como substituição parcial do cimento, há uma tendência de retardar a resistência nas primeiras idades. Porém as adições minerais possuem uma capacidade de reagir com hidróxido de cálcio e formar silicato de cálcio hidratado adicional, o que pode levar a uma redução significativa na porosidade da matriz e da zona de transição. Dessa forma, as adições minerais são efetivas no aumento da resistência à tração do concreto em idades avançadas.

É possível visualizar na Figura 4.10 que o efeito da utilização do resíduo nas misturas pode ter melhorado as propriedades da zona de transição, conseqüentemente diminuído a porosidade uma vez que houve uma tendência de aumento da resistência à tração das misturas com 10 e 15% de resíduo, as quais superaram o resultado obtido para o traço de referência. Já para o traço RV 5, é possível que o ponto referente aos 28 dias possa ter sofrido alguma alteração devido a possibilidade de variabilidade do método de ensaio, fazendo com que o mesmo saísse na linha de tendência.

4.2.2.3 Análise do módulo de elasticidade estático

Os atributos elásticos de um material são uma medida de sua rigidez. Apesar do comportamento não linear do concreto, é necessária uma estimativa do módulo de elasticidade para determinar as tensões induzidas pelas deformações associadas aos efeitos ambientais. O cálculo do módulo de elasticidade também é necessário para dimensionar as tensões de

projeto em um elemento qualquer, e momentos e deformações em estruturas mais complexas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

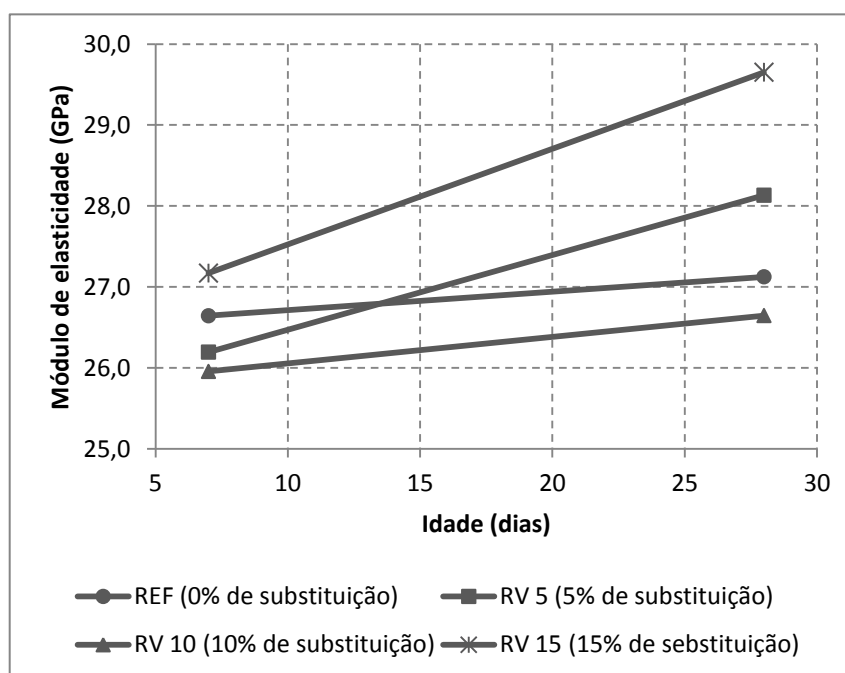
Os ensaios de módulo de elasticidade foram realizados nas idades de 7 e 28 dias e os procedimentos adotados constam na NBR 8522 (ABNT, 2008). Os valores médios do módulo de elasticidade obtidos para cada idade podem ser observados na Tabela 4.13 e Figura 4.11.

Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade para cada mistura de concreto

Traço	Idade	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de variação (%)
REF	7	26,6	0,5	1,7
	28	27,1	2,6	9,7
RV5	7	26,2	1,3	5,1
	28	28,1	1,0	3,7
RV 10	7	26,0	1,0	3,7
	28	26,7	1,8	6,9
RV 15	7	27,2	2,6	9,5
	28	29,7	2,7	9,1

Fonte: acervo pessoal

Figura 4.11 – Módulo de elasticidade dos concretos



Fonte: acervo pessoal

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os principais fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto são os tipos de agregados, matriz da pasta de cimento, zona de transição e parâmetros de ensaio. Dentre esses fatores, os que influenciaram em mudanças significativas para cada mistura desta pesquisa foram a matriz da pasta de cimento e a zona de

transição, pois os demais fatores foram mantidos constantes. Na Tabela 4.13 pode-se observar que os resultados obtidos para as amostras com resíduo se aproximaram da amostra de referência.

Ao submeter os resultados à análise de variância (ANOVA), constatou-se que a única variável de influência nos resultados obtidos é o fator idade conforme pode ser verificado na Tabela 4.14. Já a Figura 4.12 mostra o efeito do fator idade sobre os resultados do módulo de elasticidade.

Tabela 4.14 - Análise de variância do efeito da idade e do percentual de resíduo sobre o módulo de elasticidade

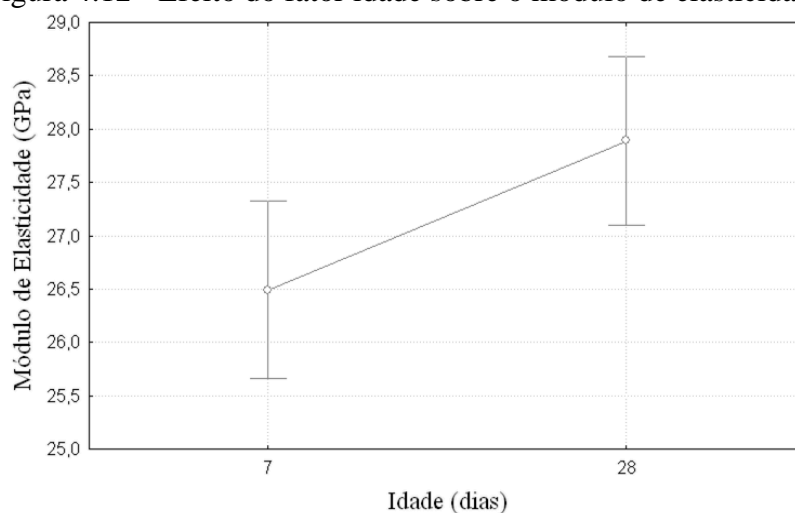
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	F _{cal}	F _{tab}	ρ-valor	Resultado
Idade (dias)	22,31	1	22,31	6,09	3,23	0,018210	Significativo
% Resíduo	28,38	3	9,46	2,582	2,84	0,067560	Não significativo
Idade (dias) x % Resíduo	8,10	3	2,70	0,737	2,84	0,536404	Não significativo
Erro	139,23	38	3,66	---	---	---	---

Nota

SQ = Soma quadrática; GL = Graus de liberdade; MQ = Média quadrática;
F = Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos;

Fonte: acervo pessoal

Figura 4.12 - Efeito do fator idade sobre o módulo de elasticidade



Fonte: acervo pessoal

O modelo estatístico adotado é significativo, de acordo com o valor apresentado de F_{cal} , superior ao valor de F_{tab} . Porém, o único fator de variação significativo foi o efeito da idade. O teor de substituição e a interação entre o fator idade e percentual de substituição,

apresentaram-se não significativos para os resultados analisados. Estes resultados corroboram com os encontrados nos estudos de Antônio (2012), em que foi analisado também o módulo de elasticidade de concretos produzidos com resíduos de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro. Nessa pesquisa o módulo de elasticidade foi analisado apenas para a idade de 28 dias, sendo assim a única fonte de variação na análise foi o percentual de substituição (5, 10, 15 e 20%) que também se apresentou como fator não significativo para os resultados obtidos em diferentes níveis de substituição do resíduo.

Taha e Nounu (2008) e Chidiac e Mihaljevic (2011) também verificaram que o módulo de elasticidade dos concretos com substituição do cimento por resíduo de vidro não mostraram diferenças significativas.

4.3 Análise microestrutural

Em uma seção transversal típica de um corpo de prova de um concreto pode ser distinguida facilmente duas fases: as partículas de agregados e o meio ligante (Figura 4.13). Dessa forma, o concreto pode ser considerado, a nível macroscópico como um material bifásico (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Porém, ao analisar esse material microscopicamente, é possível notar uma terceira fase a qual é chamada de zona de transição (ZT).

Figura 4.13 - Corpo de prova do concreto mostrando a fase agregado e meio ligante

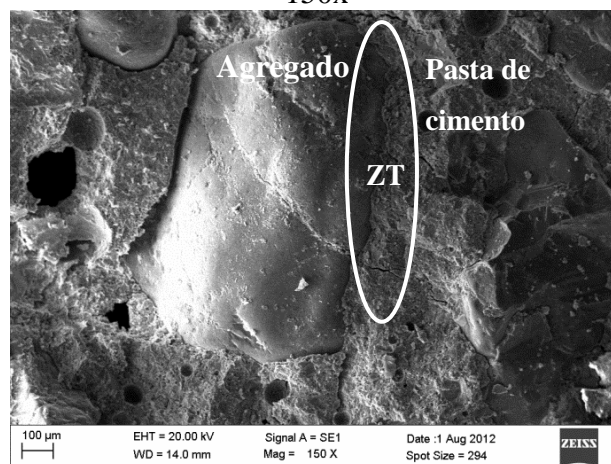


Fonte: acervo pessoal

A zona de transição representa a região interfacial entre as partículas de agregado (miúdo e graúdo) e a pasta que geralmente é mais fraca que esses dois componentes, e, conseqüentemente, exerce uma influência muito grande sobre o comportamento mecânico do concreto (Figura 4.14). A natureza altamente heterogênea do concreto aumenta a necessidade

de um conhecimento mais amplo dos aspectos microestruturais dos constituintes individuais do concreto para o entendimento e controle das propriedades do material composto em nível macroscópico.

Figura 4.14 - Imagem de concreto referência, interface pasta e agregado – MEV, ampliação 150x



Fonte: acervo pessoal

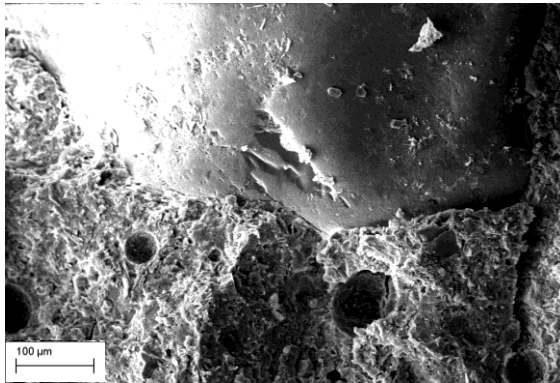
As principais fases sólidas a serem observadas nas imagens microscópicas do concreto e que irão influenciar em suas propriedades são os silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH), sulfoaluminatos de cálcio ($C_6AS_3H_{32}$ e C_4ASH_{18}) e grãos de clínquer não hidratados. As propriedades mecânicas e outras propriedades relacionadas a ela podem ser prejudicadas caso a microestrutura do concreto seja muito heterogênea, pois essas propriedades são controladas pelos extremos microestruturais e não pela microestrutura média (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Para a análise microestrutural dos concretos preparados para essa pesquisa, foram extraídos fragmentos de aproximadamente 2 a 3 cm dos corpos de prova de concreto. As amostras foram selecionadas de forma que a zona de transição entre o agregado e a pasta pudesse ser analisada. Analisar a zona de transição no estudo das propriedades do concreto é conveniente, uma vez que esta região apresenta propriedades físicas e químicas bem distintas do restante da matriz de cimento. O tamanho dos cristais e sua disposição orientada podem reduzir a resistência de ligação entre a matriz e o agregado, influenciando nas propriedades mecânicas.

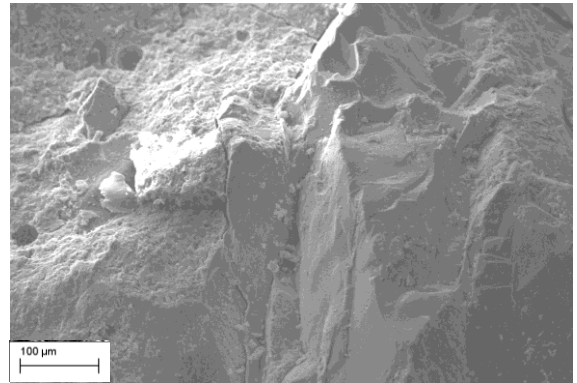
Na Figura 4.15 é possível observar a estrutura das pastas dos concretos no intuito de comparar a porosidade das mesmas.

Figura 4.15 – Micrografias dos concretos – ampliação 400x

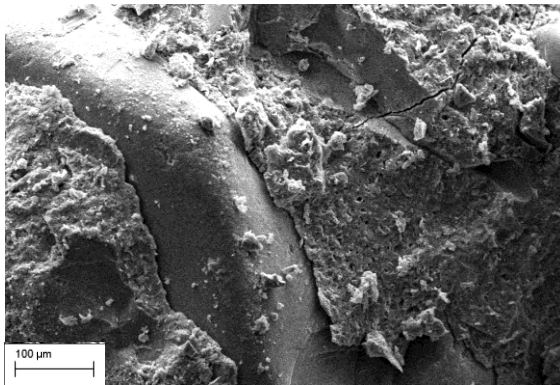
(a) REF - 28 dias



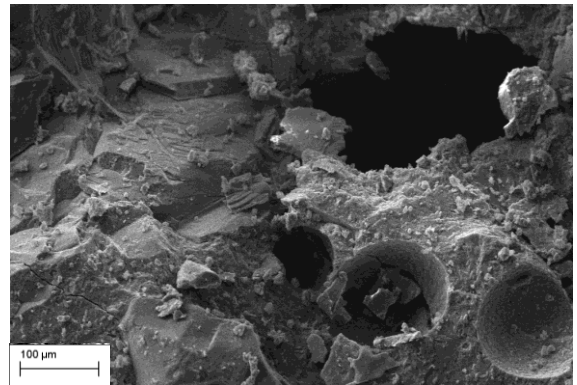
(b) REF - 270 dias



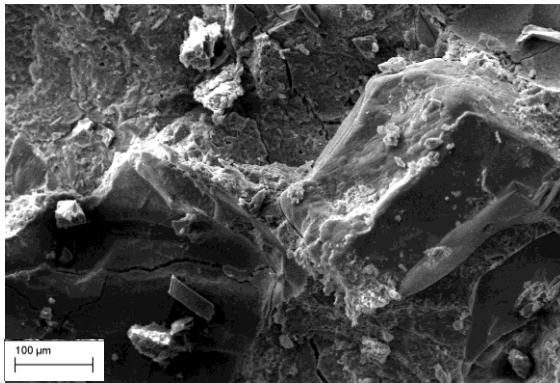
(c) RV 5 - 28 dias



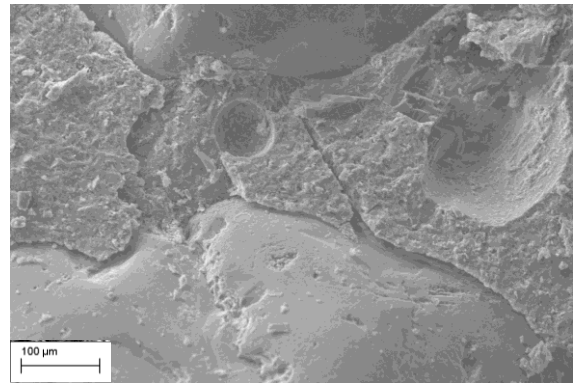
(d) RV 5 - 270 dias



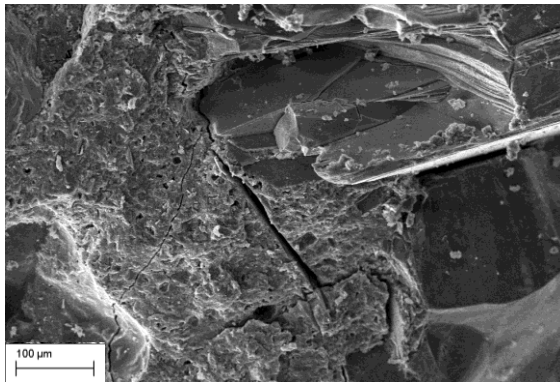
(e) RV 10 - 28 dias



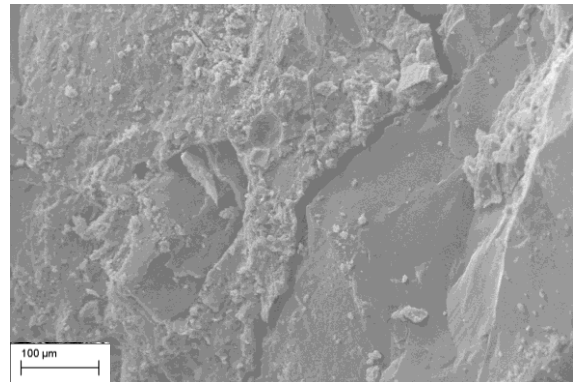
(f) RV 10 - 270 dias



(g) RV 15 - 28 dias



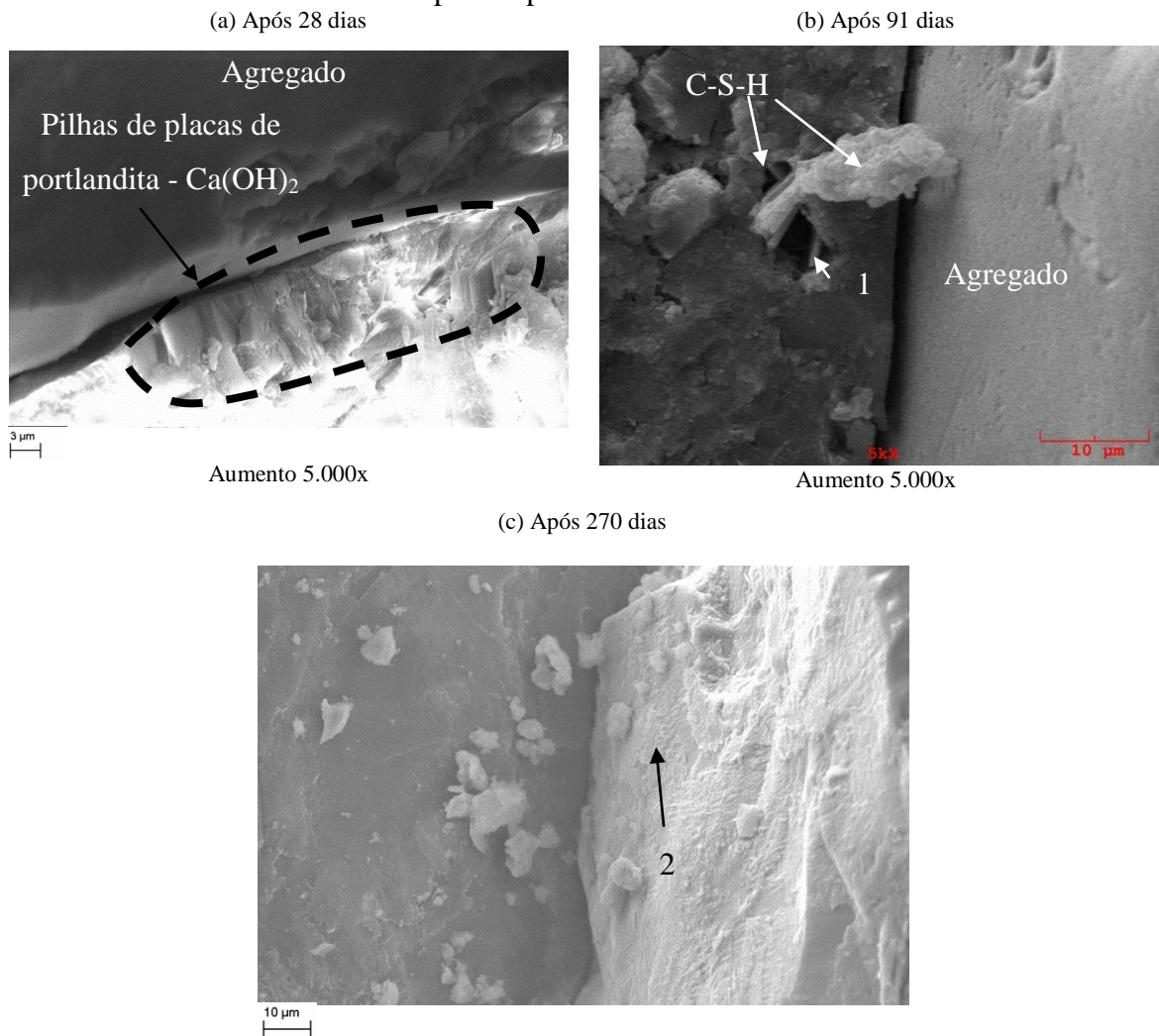
(h) RV 15 - 270 dias



As micrografias realizadas após 28 dias mostram a estrutura das pastas porosas, sendo que para o concreto REF os poros apresentam-se com dimensões maiores do que as pastas com resíduo. Além disso, nota-se que aos 270 dias as pastas apresentam uma estrutura mais densa e com poucos poros quando comparadas com as pastas aos 28 dias, exceto para o concreto RV 5 que aos 270 dias apresentou-se com poros maiores que $100\mu\text{m}$.

A Figura 4.15 apresenta micrografias típicas obtidas com a MEV das superfícies fraturadas dos concretos de controle nas idades após 28, 91 e 270 dias.

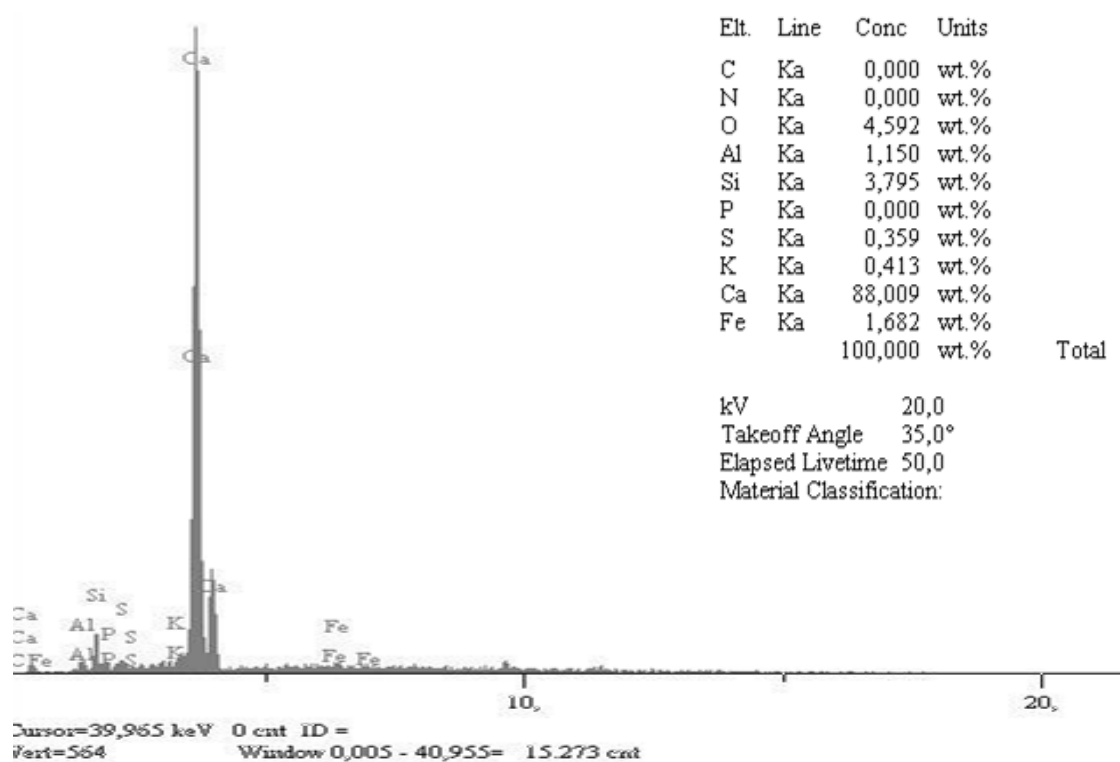
Figura 4.16 - Micrografias dos concretos de referência em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS



Aumento 5.000x
Fonte: acervo pessoal

As imagens do concreto de referência apresentadas na Figura 4.16 mostram uma homogeneidade e compacidade da pasta. Aos 28 dias nota-se, claramente, a formação cristalina de hidróxido de cálcio (portlandita) próxima à zona de transição. Já aos 91 dias é possível observar a formação de cristais fibrosos de C-S-H no interior de um poro, preenchendo os espaços entre as partículas de cimento hidratado, o que pode explicar os bons resultados de resistência à compressão desse concreto. Isso pode ser confirmado através da Figura 4.17, a qual mostra uma análise de EDS do ponto 1 marcado na Figura 4.16 (b), em que a relação C/S é igual a 23,19, ou seja, bem elevada.

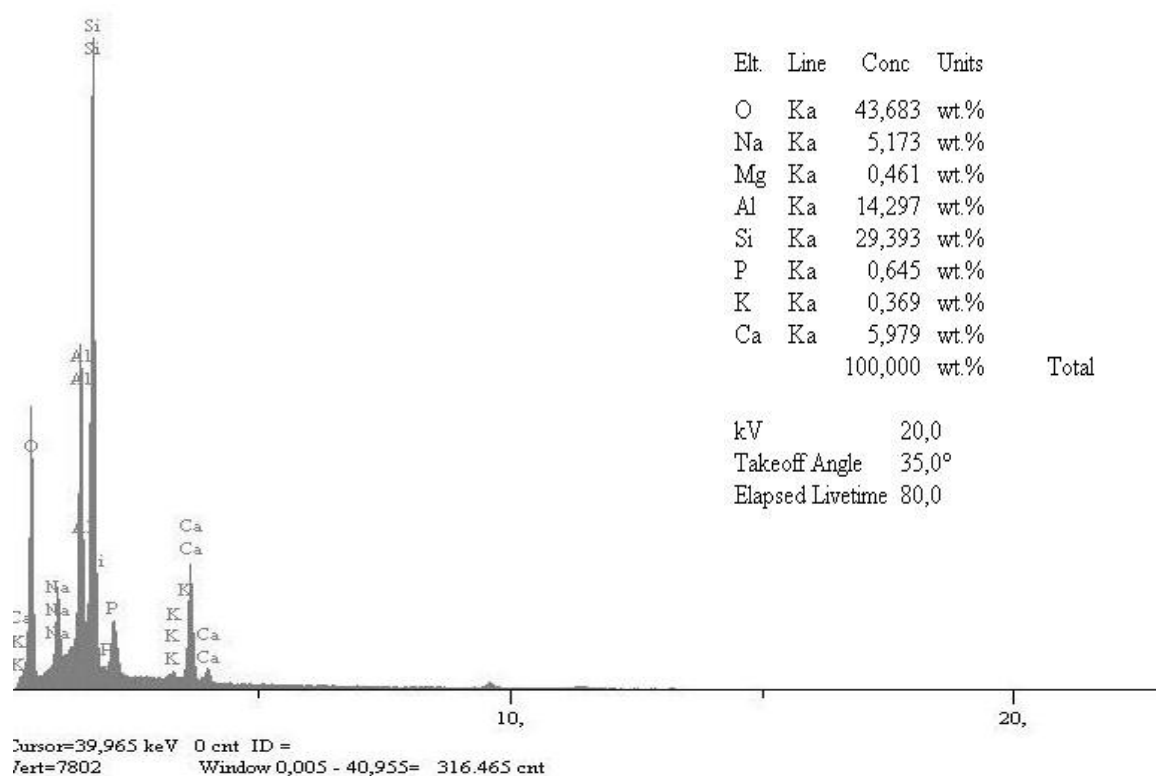
Figura 4.17- EDS do ponto 1, marcado na pasta cimentícia de traço referência 4.16 (b)



Fonte: acervo pessoal

Na Figura 4.18 é apresentada a análise de EDS para o ponto 2 marcado na micrografia do concreto de referência após 270 dias.

Figura 4.18 - EDS do ponto 2, marcado na pasta cimentícia de traço referência 4.16 (c)

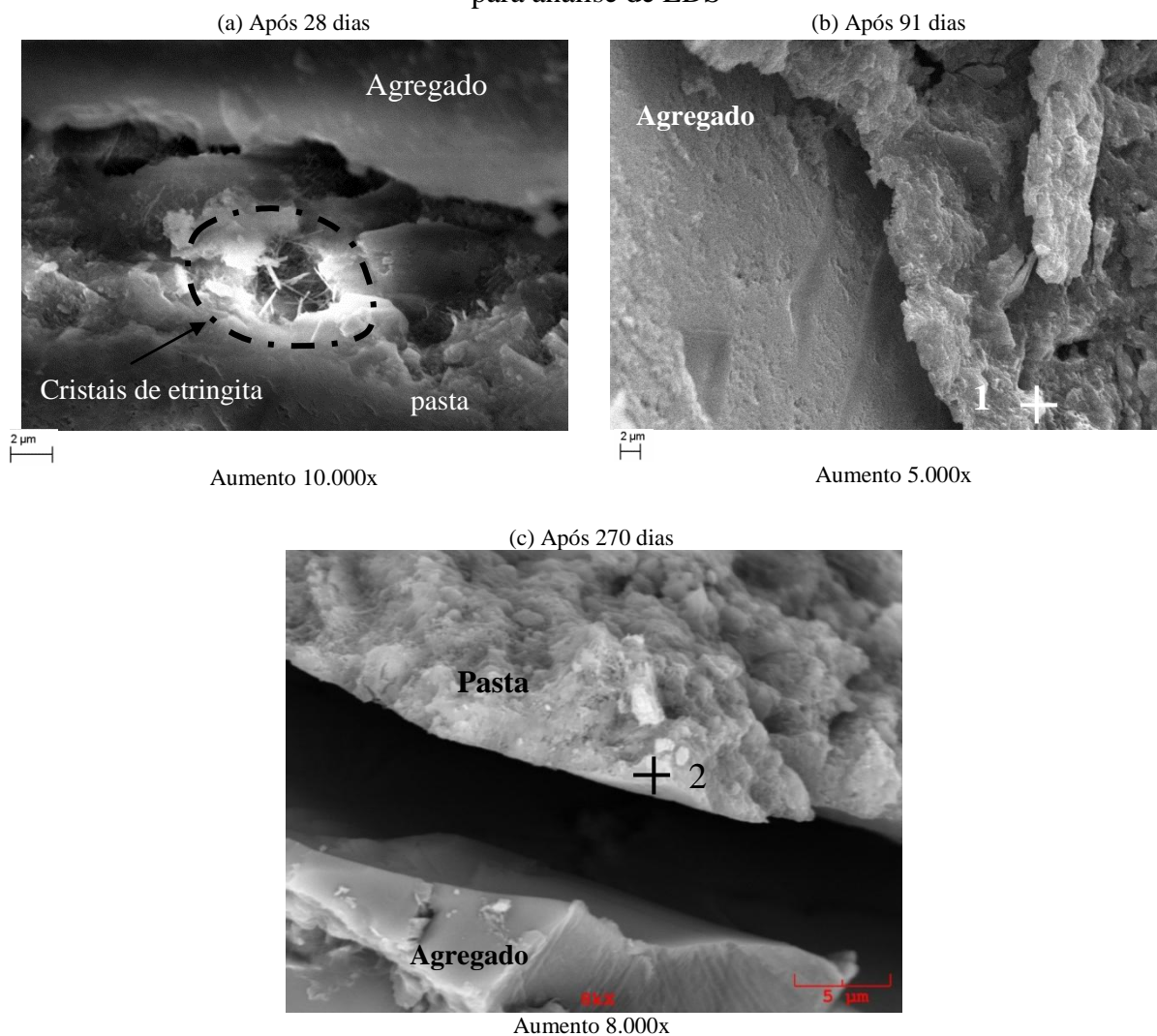


Fonte: acervo pessoal

A partir do EDS realizado para o ponto n° 2 (Figura 4.18) verifica-se a presença de Alumínio, Sílica, Cálcio e Oxigênio em maiores percentuais, o que pode estar associado à sulfoaluminatos de cálcio. Essa fase sólida ocupa de 15 a 20% do volume sólido da pasta de cimento hidratada, contém pequenas quantidades de ferro e quando na forma de monossulfato hidratado torna o concreto vulnerável ao ataque por sulfato (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A Figura 4.19 apresenta as micrografias dos concretos com 5% de substituição do cimento pelo resíduo de vidro nas idades após 28, 91 e 270 dias.

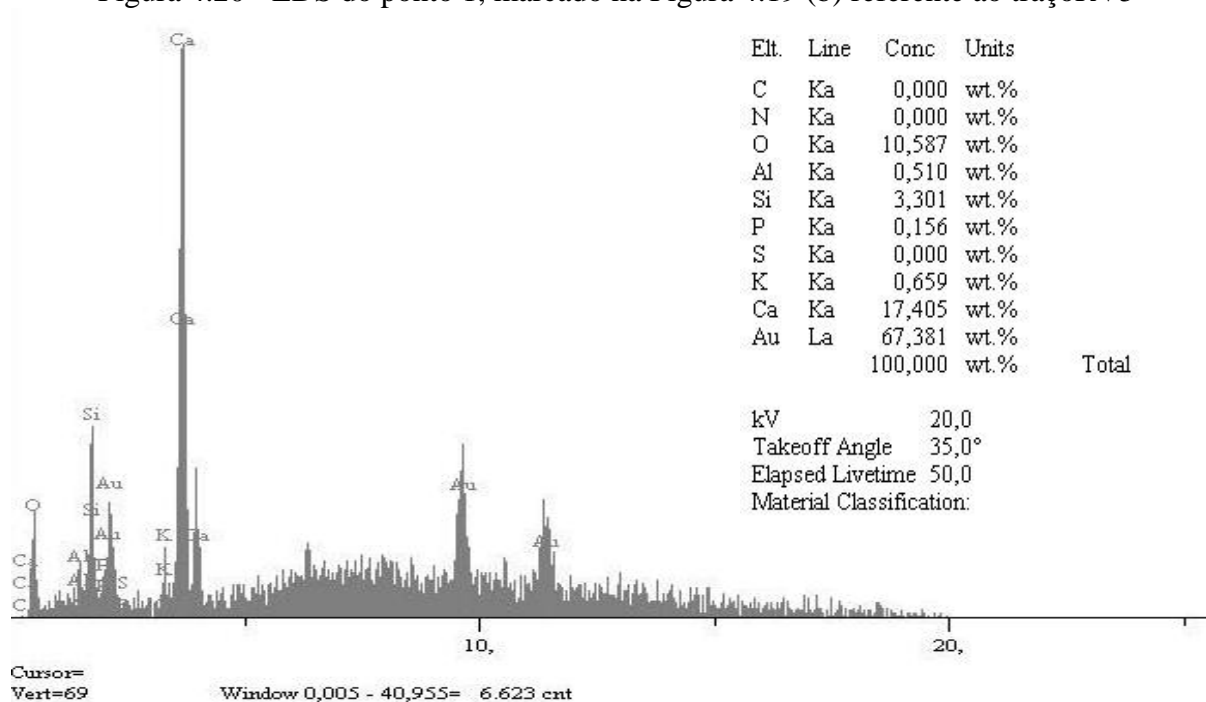
Figura 4.19 - Micrografias dos concretos RV5 em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS



Fonte: acervo pessoal

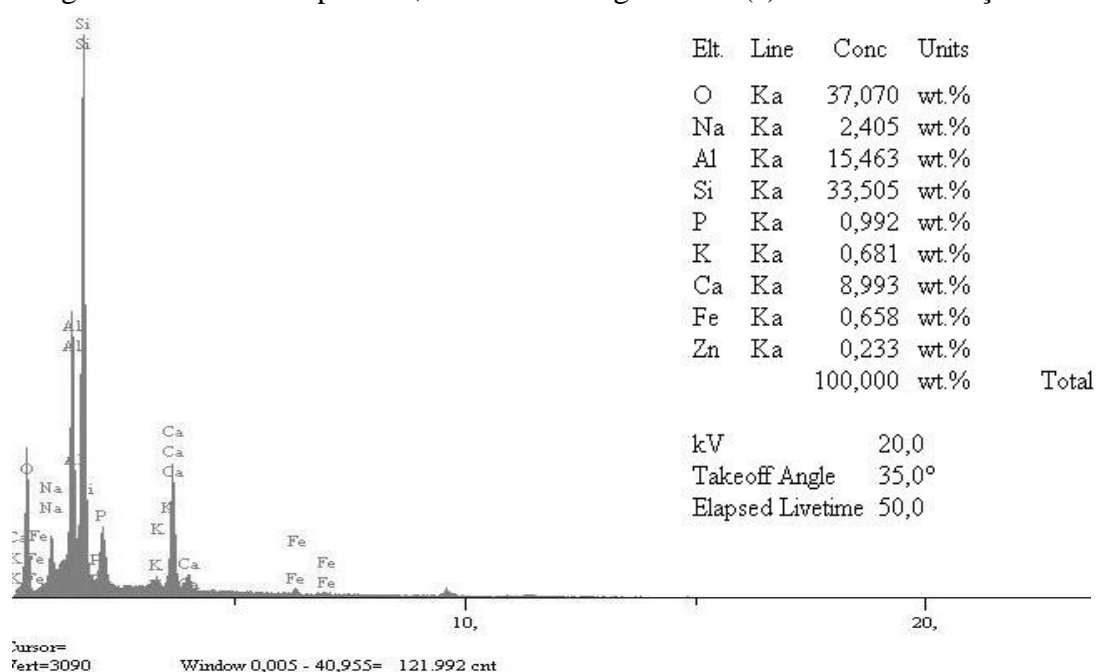
A Figura 4.19 (a) apresenta uma imagem da pasta do traço RV5 na qual se pode observar a formação de cristais aciculares de etringita na zona de transição, formados pela mistura de soluções de aluminato de cálcio e de sulfato de cálcio. Esses cristais de etringita observados na interface entre a pasta e o agregado aos 28 dias pode ter ocasionado a queda da resistência, já que nesta idade a etringita já deveria ter evoluído para C-S-H. Aos 91 dias e aos 270 dias foi marcado um ponto de análise para o EDS em cada Figura que são apresentados nas figuras 4.20 e 4.21.

Figura 4.20 - EDS do ponto 1, marcado na Figura 4.19 (b) referente ao traçoRV5



Fonte: acervo pessoal

Figura 4.21 - EDS do ponto 2, marcado na Figura 4.19 (c) referente ao traço RV5

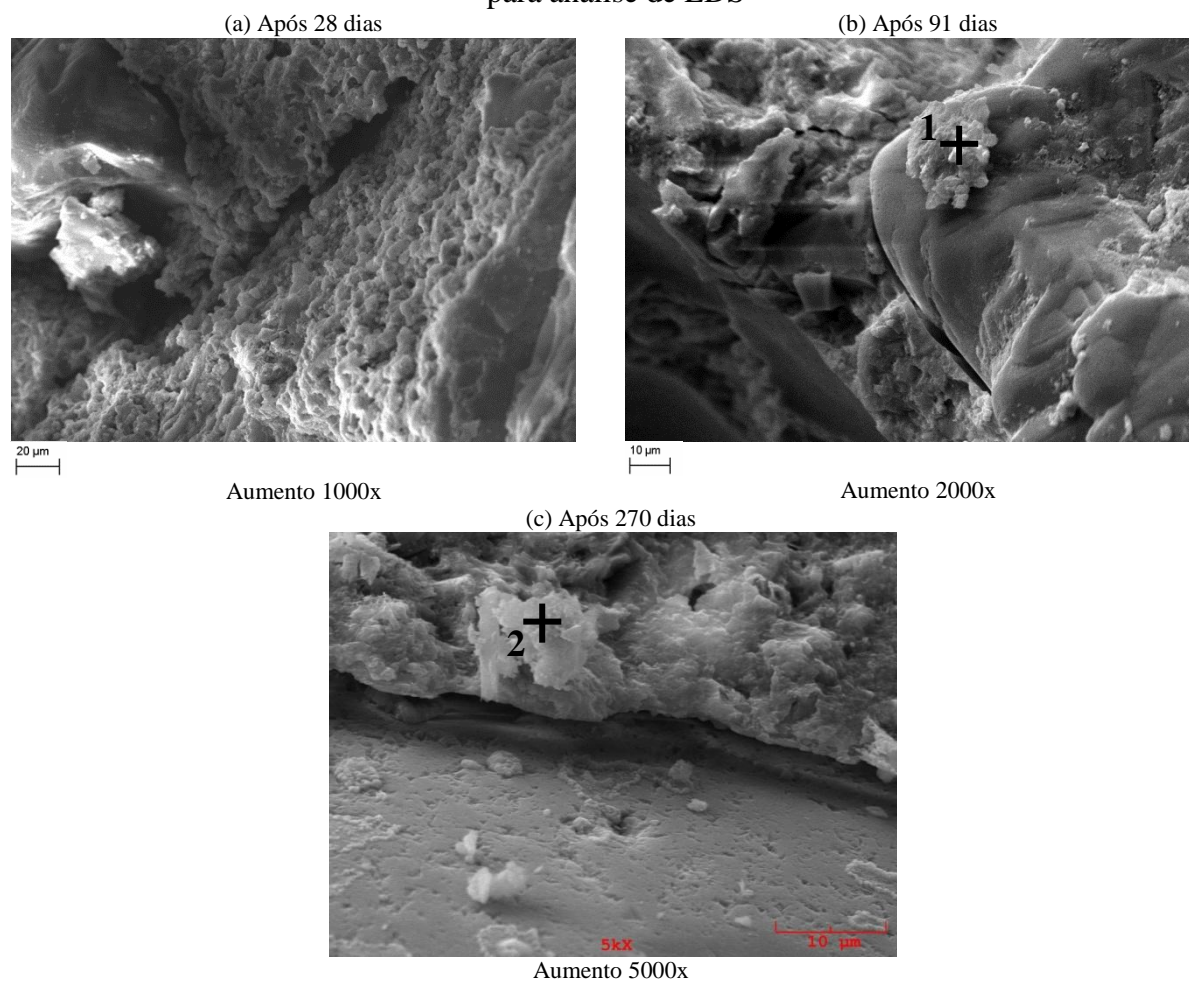


Fonte: acervo pessoal

A Figura 4.20 apresenta o EDS realizado no ponto 1 da Figura 4.19 (b), no qual é possível constatar a presença de C-S-H no estado amorfo, pois a relação C/S apresentou-se elevada para pastas cimentícias ($C/S = 17,405/3,301 = 5,27$), o que indica a formação de C-S-H na zona de transição. Estes pequenos cristais fibrosos de C-S-H preenchem os poros, antes ocupados

por água, durante a fase de hidratação do cimento tornando a argamassa mais densa e menos permeável. Isso explica o ganho na resistência do concreto aos 91 dias. Para o EDS realizado no ponto 2 da Figura 4.19 (c) verifica-se a presença de compostos como Alumínio, Sílica, Cálcio e Ferro e que podem estar associados à sulfoaluminatos de cálcio.

Figura 4.22 - Micrografias dos concretos RV10 em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS

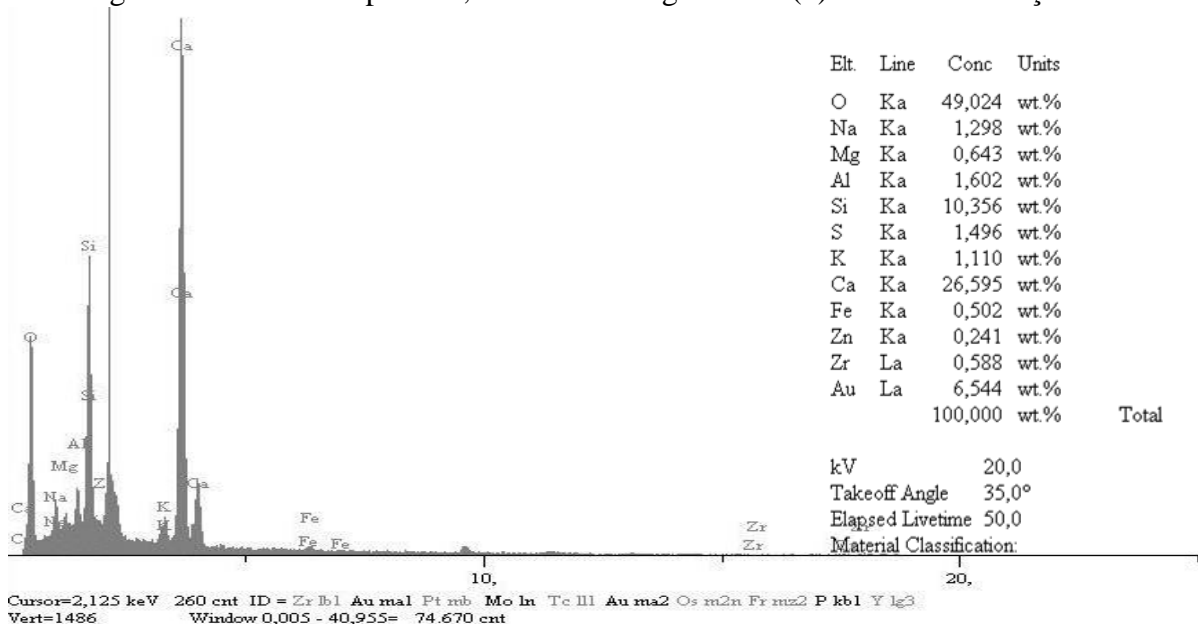


Fonte: acervo pessoal

As imagens microestruturais da pasta do traço RV10 são apresentadas na Figura 4.22. É possível visualizar uma pasta porosa aos 28 dias em que os poros ainda não foram totalmente preenchidos pelos componentes sólidos da hidratação do cimento. Segundo Grigoli e Helene (2001) os produtos da hidratação do cimento ao redor das partículas de uma pozolana tendem a preencher os vazios capilares com um material microporoso de baixa densidade. Este processo de preenchimento dos diversos vazios existentes na matriz cimentícia é conhecido como refinamento de tamanho de poros (GRIGOLI e HELENE, 2001).

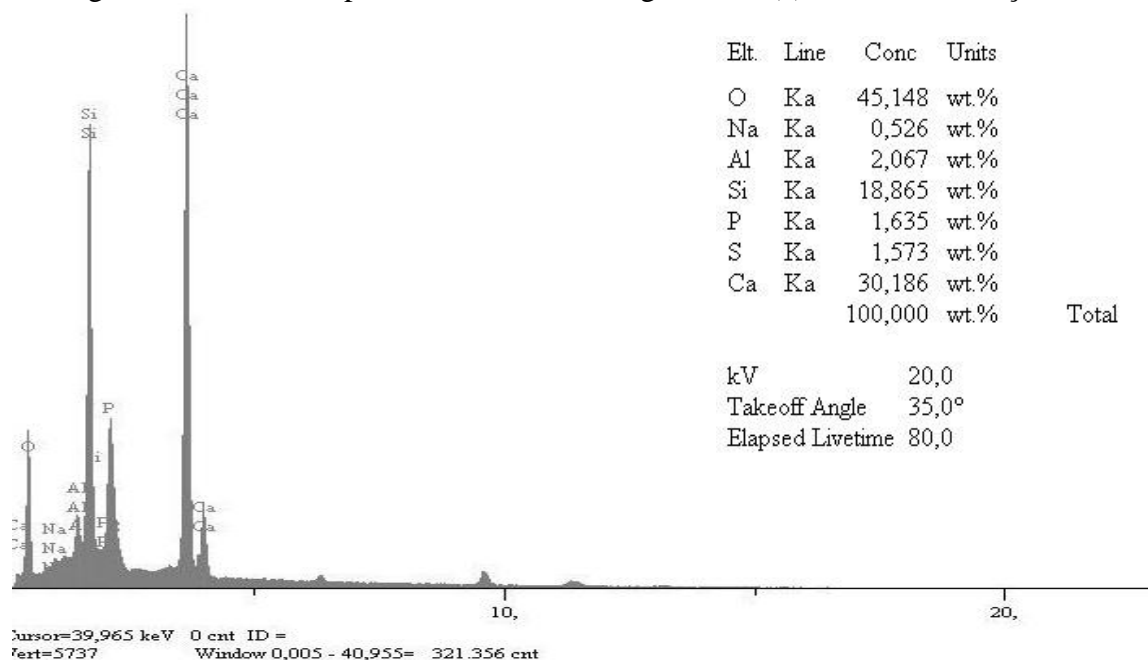
Aos 91 aos 270 dias foram feitas análises de EDS que são apresentadas nas Figuras 4.23 e 4.24, referente aos pontos marcados nas Figuras 4.22 (b) e 4.22 (c).

Figura 4.23 - EDS do ponto 1, marcado na Figura 4.22 (b) referente ao traço RV10



Fonte: acervo pessoal

Figura 4.24 - EDS do ponto 2, marcado na Figura 4.22 (c) referente ao traço RV10

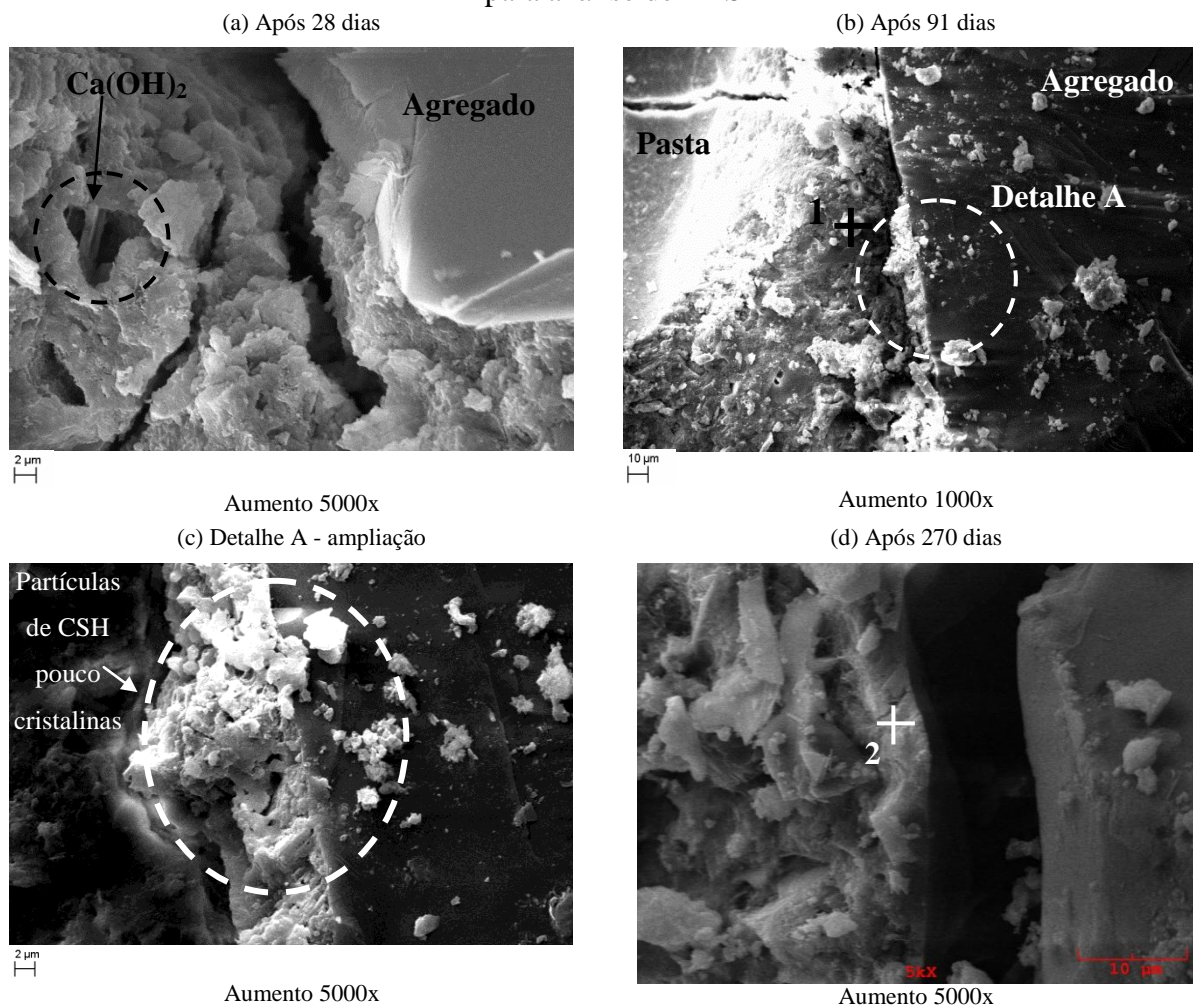


Fonte: acervo pessoal

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a relação C/S varia entre 1,5 a 2,0 para concretos de cimento Portland. De acordo com as análises de EDS apresentadas nas Figuras 4.23 e 4.24, o ponto 1 e 2 apresentam uma relação C/S igual a 2,56 e 1,6 respectivamente. A morfologia das

partículas, juntamente com o EDS leva a conclusão que se trata de uma pequena formação de C-S-H.

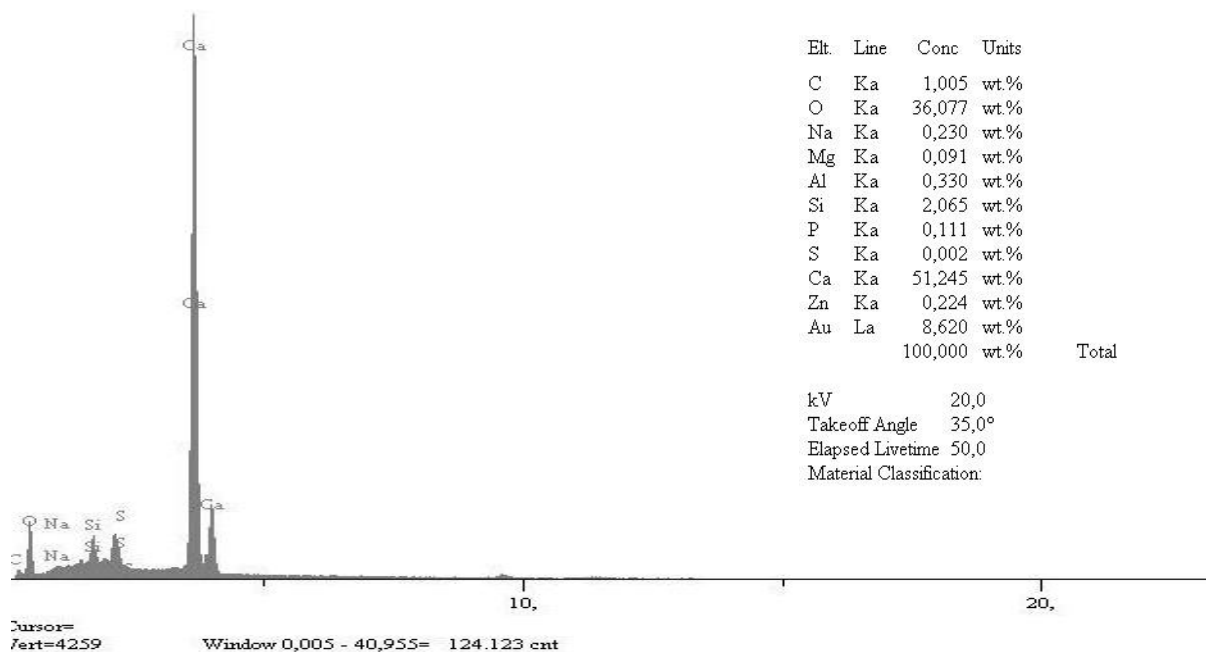
Figura 4.25 - Micrografias dos concretos RV15 em diferentes idades e marcações de pontos para análise de EDS



Fonte: acervo pessoal

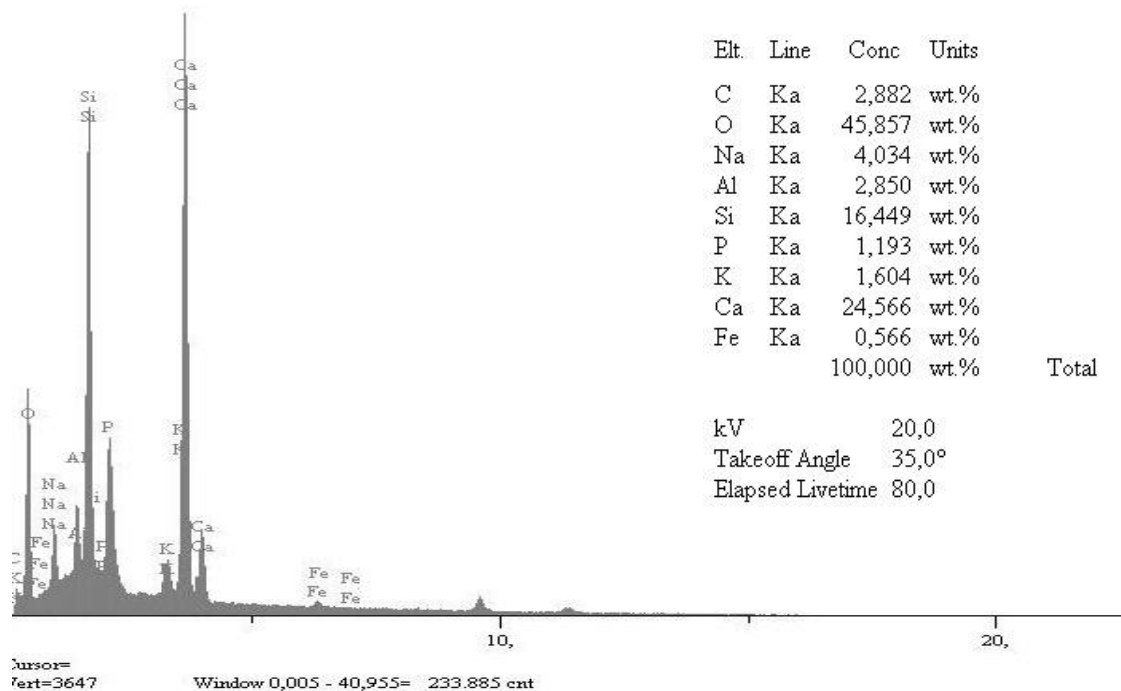
A Figura 4.25 apresenta imagens da pasta do traço RV15 nas quais também se podem observar uma estrutura mais fragmentada e bastante porosa. Na Figura 4.25 (a) verifica-se a formação de um possível hidróxido de cálcio dentro de um poro. No entanto, esse composto não foi verificado em nenhuma das imagens nas idades de 91 e 270 dias, provavelmente pela ocorrência das possíveis reações pozolânicas. Na Figura 4.25 (b), (c) e (d) é possível observar a formação de C-S-H na zona de transição entre a pasta e o agregado. A partir das Figuras 4.26 e 4.27 são apresentados os EDS dos pontos 1 e 2 marcados na Figura 4.25 (b) e (d), nas quais é possível constatar que se trata da formação de C-S-H na matriz cimentícia desse traço.

Figura 4.26 - EDS do ponto 1, marcado na Figura 4.25 (b) referente ao traço RV15



Fonte: acervo pessoal

Figura 4.27 - EDS do ponto 2, marcado na Figura 4.25 (d) referente ao traço RV15

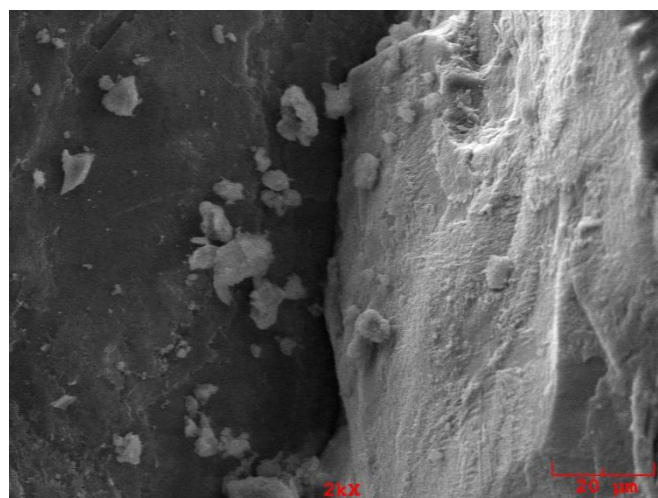


Fonte: acervo pessoal

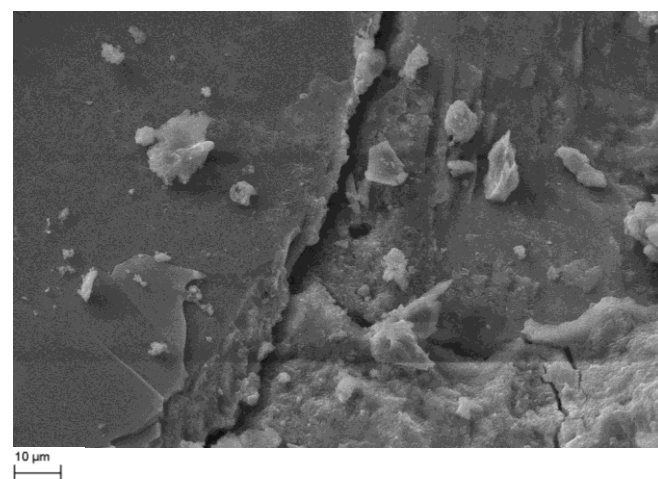
Analisando as imagens obtidas para os traços com substituição do cimento pelo resíduo nas idades mais avançadas não foram encontrados cristais de hidróxido de cálcio dispersos na microestrutura e nos poros, provavelmente devido ao consumo desses compostos pelas reações pozolânicas. Na Figura 4.28 são apresentadas imagens dos concretos de forma a comparar as zonas de transição entre os traços de concreto.

Figura 4.28– Zonas de transição dos concretos – Ampliação 2.000x

(a) REF



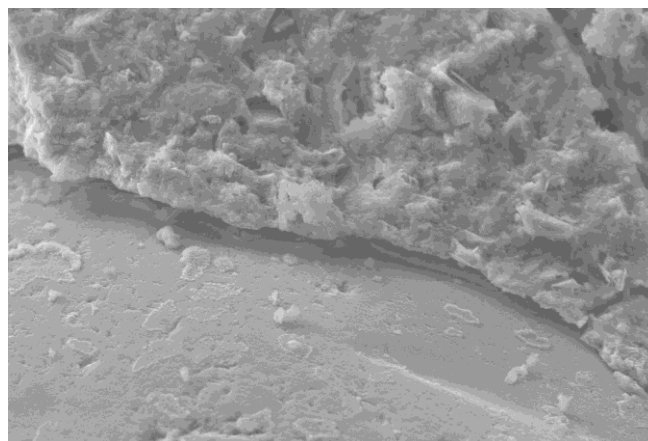
(b) RV5



Fonte: acervo pessoal

Figura 4.28 - - Zonas de transição dos concretos – Ampliação 2.000x – cont.

(c) RV 10



(d) RV 15



Fonte: acervo pessoal

A partir das imagens apresentadas na Figura 4.28, foi possível visualizar que a extensão da zona de transição dos traços com o resíduo de vidro foi maior do que a do traço de referência, influenciando diretamente nas propriedades mecânicas desses concretos.

Capítulo 5

Conclusões e considerações finais

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado proveniente de parabrisas de automóveis na preparação de concretos com o intuito de propor a utilização desse resíduo como um substituto parcial do cimento, podendo ser incorporado na preparação dos concretos ou até diretamente ao cimento no processo de fabricação.

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões dessa pesquisa baseadas nos resultados obtidos e propostas para estudos futuros na mesma linha de pesquisa.

5.1 Conclusão geral

A partir dos resultados e discussões, observou-se que a substituição parcial do cimento pelo resíduo de vidro laminado nas proporções de 0, 5, 10 e 15% nos concretos preparados não produziu uma melhoria considerável nas propriedades analisadas. Entretanto também não

gerou perdas significantes nas propriedades físicas e mecânicas em relação ao traço de referência.

Dessa forma conclui-se que os resultados apontam para a viabilidade técnica da utilização do resíduo de vidro laminado na produção de concretos como substituto parcial do cimento. Porém, novas pesquisas devem ser realizadas no sentido de estudar o comportamento de outras propriedades não analisadas nesta dissertação, sobretudo dos parâmetros relativos à durabilidade.

5.2 Conclusões específicas

5.2.1 Conclusões relativas ao resíduo de vidro laminado

A caracterização do resíduo de vidro laminado (RVL) permitiu a melhor avaliação das propriedades pozolânicas desse material. A partir dos ensaios foi possível comparar a finura do resíduo com a do cimento, sendo que 98% das partículas de vidro estavam abaixo de 75 μ m. Foi constatado ainda que a superfície específica do RVL apresentou-se maior do que a do cimento. Segundo Mehta e Monteiro (2008) o desenvolvimento da resistência pode ser controlado com o controle da finura do cimento, de forma que aumentando a finura do cimento é possível aumentar consideravelmente a resistência do concreto. Dessa forma, a finura do resíduo de vidro pode colaborar para o aumento da resistência dos concretos.

O resíduo de vidro apresentou-se predominantemente no estado amorfo verificado através da difração de raios-X.

De acordo com a composição química do resíduo de vidro, o mesmo pode ser classificado como classe E de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992), porém não atendeu aos requisitos de perda ao fogo, teor de álcalis disponíveis em Na₂O e teor de umidade. Outros pesquisadores como Matos e Sousa-Coutinho (2012) e Shao *et al.* (2000) também verificaram que o teor de álcalis (Na₂O) nos resíduos que utilizaram, apresentou-se acima dos limites estabelecidos nas normas para materiais pozolânicos. Matos e Sousa-Coutinho (2012) verificaram que o consumo de álcali na estrutura de gel C-S-H durante a reação pozolânica ocorre antes que a RAS e autores como Corinaldesi *et al.* (2005), Ismail e Al-Hashmi (2009),

Araújo *et al.* (2011) e Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2011) observaram que em matrizes cimentícias com incorporação de resíduo de vidro de granulometria fina as expansões por RAS foram controladas. Sendo assim, provavelmente, não há problemas com o alto teor alcalino apresentado para o resíduo.

Dessa forma, o resíduo de vidro laminado pode ser considerado um material pozolânico de acordo com sua composição química e física, uma vez que o índice de atividade pozolânica determinado através da NBR 5752 (ABNT, 1992) foi de 86,36%.

5.2.2 Conclusões relativas ao concreto no estado fresco

Durante a preparação dos traços de concretos com os diferentes percentuais de substituição não foi possível constatar diferença na trabalhabilidade das misturas. Através dos ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone, verificou-se uma ligeira diminuição da consistência das amostras, porém todas apresentaram um aspecto coeso e plástico.

As misturas com teores de resíduo apresentaram um incremento no valor da massa específica em relação ao concreto de referência.

A preparação dos traços com substituição pode seguir o mesmo procedimento que utilizado para a execução do traço de referência apesar das variações das propriedades no estado fresco apresentadas.

5.2.3 Conclusões relativas ao concreto no estado endurecido

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial mostraram, a princípio, que nenhuma das misturas com percentual de substituição ultrapassou a resistência à compressão do traço de referência e também não atingiu os 40 MPa aos 28 dias. Porém, aos 91 dias todos os traços com substituição alcançaram o mínimo de 40MPa estabelecido inicialmente no programa experimental.

Através da análise estatística realizada sobre os resultados desse ensaio, verificou-se o decréscimo da resistência à compressão à medida que o percentual de substituição do resíduo aumentava. Esta diminuição é devido à variação no consumo de cimento e ao aumento na relação a/c nas misturas.

De acordo com o tratamento estatístico realizado os fatores investigados nos resultados de resistência à tração por compressão diametral foram significativos, sendo o fator idade o de maior significância. Verificou-se que os resultados apresentados decresceram à medida que o percentual de substituição aumentava. Essa diminuição da resistência à tração por compressão diametral pode estar relacionada com o tamanho da zona de transição dos concretos que se apresentou maior à medida que se aumentava o teor de resíduo de vidro nos concretos.

Já para os resultados de determinação do módulo estático de elasticidade, constatou-se que a única variável de influência nos resultados obtidos foi o fator idade.

A análise microestrutural demonstrou que os concretos com teor de substituição apresentaram-se nas primeiras idades mais porosos do que os concretos de referência, porém com dimensões menores do que os poros do concreto de referência. Aos 270 dias, os concretos já apresentavam uma pasta mais homogênea e menos porosa. As análises de EDS mostraram a presença de C-S-H nas misturas com teor de substituição, preenchendo os poros e indicando a ocorrência de reações pozolânicas. Nas idades mais avançadas, não foram identificados cristais de hidróxido de cálcio dispersos na microestrutura e nos poros dos concretos com substituição, provavelmente, devido ao consumo do hidróxido de cálcio pelas reações pozolânicas.

5.2.4 Sugestões para futuros estudos

A realização desse trabalho incitou a busca por outras análises que seriam inviáveis executar devido ao tempo disponível para essa pesquisa. Dessa forma, sugerem-se algumas pesquisas para estudos futuros:

- Análise das propriedades relativas à durabilidade dos concretos produzidos com o resíduo de vidro laminado;
- Estudo da utilização desse resíduo como adição na preparação de concretos e a possibilidade de utilização do mesmo em maiores teores;
- Investigação do tipo de cimento mais adequado para aplicação do resíduo de vidro laminado em concretos para diversos tipos de granulometrias;
- Análise da relação água/resíduo de vidro laminado.

Referências

Referências normativas e bibliográficas

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

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 dos corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR 5751 - Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica - Índice de atividade pozolânica com cal.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 5752 – Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro, 1992.

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

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

_____. **NBR 7222 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndrico.** Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 8953 - Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência.** 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 11579 - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200) - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 11706 – Vidro na construção civil.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 12653 - Materiais Pozolânicos - Especificação.** Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 14207 – Boxes de banheiro fabricados com vidro de segurança.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 14564 – Vidros para sistemas de prateleiras - Requisitos e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR 14656 - Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14697 – Vidro laminado.** Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 14698 – Vidro temperado.** Rio de Janeiro, 2001.

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

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

_____. **NBR NM 20 - Cimento Portland e suas matérias primas - Análise química - Determinação de dióxido de carbono por gasometria.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 23 - Cimento Portland - Determinação e massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NBR NM 45 – Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR NM 52 – Agregado miúdo - Determinação de 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, 1996.

_____. **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.

_____. **NBR NM 293 – Terminologia de vidros planos e dos componentes acessórios a sua aplicação.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 294 – Vidro float.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR NM 298 – Classificação do vidro plano quanto ao impacto.** Rio de Janeiro, 2006.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVIDRO - **Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro**. Disponível em: <http://www.abividro.org.br>, acesso em 9 de Junho de 2013.

ABRAVIDRO - **Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano**. Disponível em: <http://www.andiv.com.br/>. Acesso em 9jun 2011.

ANTÔNIO, A.P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos**. Dissertação (Mestrado). Curso de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Vitória, ES, 2012.

ALI, M.B; SAIDUR, R; HOSSAIN, M.S. **A review on emission analysis in cement industries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n°15, p.2252-2261, 2011.

ARAÚJO, A. P.; PERUZZI, A. de P.; DIAS, J. F; da, SILVA, T. J. **Verificação das atividades pozolânicas do pó de resíduo de vidro em argamassas cimentícias**. In: 53° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: IBRACON, 2011.

BARBOZA, A.S.R *et al.* **Avaliação do uso de bambu como material alternativo para execução de habitação de interesse social**. Ambiente Construído, v.8, p. 115-129, 2008.

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: 52° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: IBRACON, 2010.

BRAGANÇA, S.R; BERGMANN, C.P. **Traditional and glass powder porcelain: Technical and microstructure analysis**. Journal of the European Ceramic Society, n°24, p. 2383-2388, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, no 136, 17 de julho de 2002. Seção 1, p. 95-96. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legipesq.cfm?tipo=3&numero=307&ano=&texto=>>. Acesso em: 03 jun. 2010.

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.

CASSAR J; CAMILLERI J. **Utilisation of imploded glass in structural concrete**. Construction and Building Materials. N°29, p. 299-307, 2012.

Cebrace – **Companhia Brasileira de Cristal**. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br>>. Acesso em 5jul 2012.

CEMPRE – **Compromisso Empresarial para a Reciclagem**. Disponível em: <<http://www.cempre.org.br>>. Acesso em 8 jun 2010.

CHEN, S. *et al.* **Waste E-glass particles used in cementitious mixtures.** Cement and Concrete Research.N.36, 2006.

CHEN, S. *et al.* **A state-of-the-art review and evaluation of tools for factory sustainability assessment.** Procedia CIRP.N.9, p. 85-90, 2013.

CHIDIAC S.E; MIHALJEVICS. N. **Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates.** Cement and Concrete Composites, n° 33, p.855-863, 2011.

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.

CURWEL, S; COOPER, I. **The implications of urban sustainability.** Building Research and Information.V.26, n°1, p. 17-28, 1998.

DU, H.; TAN, K.H. **Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties.** Cement and Concrete Composites, v.35, p. 109-117, 2013a.

DU, H.; TAN, K.H. **Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods.** Cement and Concrete Composites, v.35, p. 118-126, 2013b.

FEDERICO, L.M.; CHIDIAC, S.E. **Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods.** Cement and Concrete Composites, n°37, p.606-610,2009.

FRAGATA, A.; VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L.; FERREIRA, V.M. **Incorporação de Resíduos de Vidro em argamassas de revestimento – Avaliação da sua influência nas características da argamassa.** 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Parque das Nações – Lisboa, 2007.

GRIGOLI, Ademir Scobin ; HELENE, Paulo R. L. ; DJANIKIAN, João Gaspar. **Aspects of durability of concrete with minute and very thin aggregate, according to criteria based on the penetration of chloride ions.** International Conference On High - Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, 3., 2002, Recife. Artigo Técnico, 2002, Recife, PE, 2002. 18 p.

GOBBI, A.; MATTANA, A. J.; MEDEIROS, de M. H. F. **Uso de análise hierárquica para a escolha de adições pozolânicas para o concreto: Uma aplicação inicial.**Anais do 53º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2011.

HELENE, P.; TERZIAN, P.**Manual de dosagem e controle do concreto.** Pini; Brasília, DF.SENAI, 1992.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. **Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet.**Cement& Concrete Composites, v. 33, p. 19-29, 2011.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.** Waste Management, n°29, p.655-659, 2009.

JAIME, S.B.M; ORTIZ, S.A. **Agregando valores às embalagens de vidro**. Instituto de Tecnologia de Alimentos. Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens, vol.12, nº1, 2000.

JOHN, Vanderley M; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. Seminário Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2000.

KHMIRI, A.; SAMET, B.; CHAABOUNI, M.A **cross mixture design to optimize the formulation of a ground waste glass blended cement**. Construction and Building Materials, v. 28, p. 680-686, 2012.

KOU, S.C; POON, C.S. **Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate**. Cement and Concrete Composites, nº31, p. 107-113, 2009.

KRUGER, F.R; OLIVEIRA, D.L.A; BRAGA, S.R.O.Q. **Incorporação de vidro plano moído em substituição ao cimento e ao agregado miúdo (areia) em argamassas de concreto**. 25ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. Poços de Caldas, 2002.

LIMA, S. A; ROSSIGNOLO, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca de castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. Acta Scientiarum Technology, v.32,p.383-389,2010.

LING, T.; POON, C.A **comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar**. Journal of Cleaner Production, v.29-30, p. 46-52, 2012.

LUZ, A.P; RIBEIRO, S. **Uso de pó de vidro como fundente para a produção de grés porcelanato**. Revista Matéria, p.96-103, 2008.

MAIER, P.R; DURHAM, S.R. **Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures**. Construction and Building Materials, v. 29, p.428-437,2012.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. **Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement**. Construction and Building Materials, v. 36, p. 205-215, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais**, 3 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, p. 674, 2008.

MME - Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não Metálicos**. Brasília, 2012.

NASSAR R.; SOROUSHIAN P. **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement**. Construction and Building Materials, v. 29, p. 368-377, 2012.

NETO J. C. M. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo: RIMA, 162p. 2005.

OLIVEIRAC. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. São Paulo, Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 162p. 2000.

OZKAN, O; YUKSEL, I. **Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products.** Construction and Building Materials, n° 22, p. 1288-1298, 2008.

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: 52° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. Anais. Fortaleza: IBRACON, 2010.

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

PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L. A.; CASTRO-GOMES, J. P.; SANTOS, P. M. S. **The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components.** Construction and Building Materials, v. 31, p. 197-203, 2012.

RIBEIRO, J. L.D; CATEN, C. S. T. **Projeto de experimentos.** PortoAlegre: UFRGS, 2011.

SCHWARZ, Nathan; NEITHALATH, Narayanan. **Influence of a fine glass powder on cement hydration: comparison to fly ash and modeling the degree of hydration.** Cement and Concrete Research, n°38, p.429-436,2008.

SHAO, Y. *et al.* **Studies on concrete containing ground waste glass.** Cement and Concrete Research, n°30, p.91-100, 2000.

SHAYAN, A.; XU, A. **Value-added utilization of waste glass in concrete.** Cement and Concrete Research, n°34,2004.

SHAYAN, A.; XU, A. **Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs.** Cement and Concrete Research, n°36, p.457-468,2006.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H..**Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders.** Cement and Concrete Research, n°35, 2005.

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

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; SANTOS, J. C. P. dos. Vidros na Construção Civil. 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, v. 1, cap.21, p. 655-691, 2007.

SOBOLEV, K. *et al.* **Utilization of waste glass in ECO-cement: Strenght properties and microstructural observations.** Waste management, n°27, p. 971-976, 2007.

TIBONI, R.A **utilização da cinza de casca de arroz de termoeétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento Portland.** Dissertação (Mestrado).Universidade de São Paulo (USP). São Carlos, 2007.

TAHA, B; NOUNU, G. **Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement.** Construction and Building Materials, nº22, p.713-720, 2008.

TAHA, B; NOUNU, G. **Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete.** Journal of Materials in Civil Engineering, nº21, p.709-721, 2009.

TOPÇU, I; CANBAZ, M. **Properties of concrete containing waste glass.** Cement and Concrete Research, nº34, p.267-274,2004.

TURGUTI, Paki. **Properties of masonry blocks produced with waste limestone sawdust and glass powder.** Construction and Building Materials, nº22, p. 1422-1427, 2008.

VARGAS, Isabela M.; WIEBECK, Hélio. **Reciclagem de Vidro Laminado: Utilização dos vidros de baixa granulometria como carga abrasiva na formulação de vernizes de alto tráfego para pisos de madeira.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol.17, nº2, p.137-144,2007.

WEBER. S. L. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz.** Florianópolis, Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 98p. 2001.