

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

ALINE SILVA SAUER

**ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE
VIDRO LAMINADO EM ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO
ESTRUTURAL**

VITÓRIA
2013

ALINE SILVA SAUER

**ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO LAMINADO
EM ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL**

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.

Orientador: Prof. Dr. Ing. João Luiz Calmon N. da Gama

Co-orientadora: Geilma Lima Vieira

Vitória

2013

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

S255e Sauer, Aline Silva, 1983-
Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural / Aline Silva Sauer. – 2013.
180 f. : il.

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

1. Resíduos de vidro - Reaproveitamento. 2. Argamassa. 3. Atividade pozolânica. I. Gama, João Luiz Calmon Nogueira da. II. Vieira, Geilma Lima. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

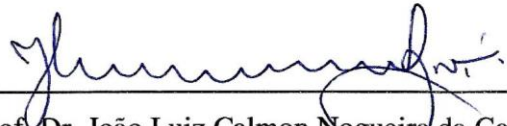
CDU: 624

**ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO
LAMINADO EM ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL**

Aline Silva Sauer

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

Aprovada no dia **15 de julho de 2013** por:



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil- UFES
Orientador



Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Doutora em Engenharia Civil- UFES
Co-orientadora



Prof. Dr. Fernando Avancini Tristão
Doutor em Engenharia Civil- UFES
Membro Interno



Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro
Doutor em Engenharia Civil- UFPE
Membro Externo

*A todos que me acompanharam,
apoiaram e ajudaram em mais essa
etapa da minha caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Aos professores João Luiz Calmon e Geilma, pela orientação, dedicação, incentivo, sugestões, contribuições e ensinamentos, técnicos ou não, ao longo desta pesquisa.

Ao professor Fernando Avancini, pela força, dedicação e incentivo. Por estar sempre por perto, disponível a contribuir.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da UFES, pelos ensinamentos ao longo de todo o curso de mestrado.

Aos colaboradores do Laboratório de Materiais de Construção do Centro Tecnológico da UFES e do Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais também do Centro Tecnológico da UFES, que contribuíram com empenho, dedicação e competência ao longo deste estudo.

A todos da secretaria do PPGEC-UFES pelo empenho e disposição.

Aos meus queridos amigos e companheiros de jornada, Amábeli, Lorena, Sandra, Soraia, Ivana, Juliana, Rubielly, Vanessa, Yustane, entre outros, pelos bons momentos, boas lembranças, partilha de conhecimentos e experiências. Amigos que aprendi a respeitar e admirar pelos profissionais e pessoas maravilhosas que são.

A uma amiga muito especial, Aline Pignaton, que foi a grande responsável pelo início desta caminhada. Muito obrigada pelo carinho, incentivo, dedicação, por toda a amizade a mim dedicada.

Ao meu esposo, Saulo, por seu carinho, companheirismo, amor, dedicação, paciência e incentivo.

Aos meus pais, pelo constante incentivo, compreensão e amor, toda a minha gratidão.

As empresas Holcim e Massfix pelo fornecimento do material necessário ao procedimento experimental desta pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À UFES pela estrutura disponibilizada.

Finalmente, a todos que de uma maneira ou de outra, contribuíram ao longo desta caminhada.

***"Comece fazendo o que é necessário,
depois o que é possível, e de repente
você estará fazendo o impossível."***

São Francisco de Assis

SAUER, Aline Silva. **ESTUDO DO POTENCIAL DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO LAMINADO EM ARGAMASSAS DE RECUPERAÇÃO ESTRUTURAL**. 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

RESUMO

A construção civil é considerada uma grande consumidora de recursos naturais e geradora de resíduos. Para minimizar estes impactos surgem novas alternativas, dentre elas a reutilização de resíduos incorporados a materiais de construção, apontada como uma forma adequada de preservar matérias-primas naturais, economizar energia, reduzir a emissão de poluentes e eliminar os custos com aterros. Estudos sobre a incorporação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias indicam a utilização deste resíduo como substituto de agregados ou aglomerantes, sendo este último o mais recomendado, uma vez que em fina granulometria (abaixo de 75 μm) o resíduo de vidro possui alto índice de atividade pozolânica, o que pode melhorar as propriedades mecânicas das matrizes cimentícias. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado de parabrisas em argamassas de recuperação estrutural, analisando a influência da variação do percentual de substituição (em massa) do cimento por este resíduo (7%, 13%, 20% e 26%, além da argamassa de referência). Foram analisadas propriedades no estado fresco, trabalhabilidade e massa específica, e no estado endurecido, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, retração linear e resistência de aderência à tração, além da análise da absorção de água por capilaridade e microestrutural. A argamassa com 7% de substituição de cimento por resíduo de vidro apresentou os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico, com valores próximos aos encontrados para a argamassa referência. A permeabilidade das argamassas tende a diminuir com o aumento do teor de substituição, sendo que a argamassa com 26% de substituição apresentou os menores valores de absorção por capilaridade. Entretanto, a incorporação do resíduo de vidro tornou a estrutura das argamassas mais porosa, mas o tamanho dos poros foi reduzido, havendo indícios da formação de C-S-H adicional por meio de reações pozolânicas. Estes resultados indicam o potencial de utilização do resíduo de vidro como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação estrutural, merecendo ainda, maiores pesquisas, principalmente no que concerne aos aspectos de durabilidade.

Palavras-chave: resíduo de vidro laminado de parabrisas, argamassa de recuperação, material cimentício, atividade pozolânica, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

The building is considered a major consumer of natural resources and generating waste. To minimize these impacts are new alternatives, among them the reuse of waste incorporated into building materials, which has been suggested as an appropriate way to preserve natural raw materials, save energy, reduce pollutant emissions and eliminate the costs of landfills. Studies on the incorporation of glass waste into cementitious matrices indicate the use of waste as a substitute for aggregates or agglomerates, the latter recommended, since in the fine particle (less than 75 μm) waste glass has high pozzolanic activity index, which can improve the mechanical properties of the cementitious matrices. This research aimed to evaluate the potential application of the windshield waste laminated glass in structural repair mortars, analyzing the influence of the variation in the percentage of replacement (by mass) of the cement for this waste (7%, 13%, 20% and 26%, and the reference mortar). Were analyzed in the fresh state properties, workability and density, and in the hardened state, compressive strength, modulus of elasticity, linear shrinkage and tensile strength, as well as analysis of water absorption by capillarity and microstructure. The mortar with 7% cement replacement by waste glass showed the best results regarding the mechanical performance, with values close to those found for the reference mortar. Already the permeability of the mortar tends to decrease with increasing level of substitution, where the mortar with 26% replacement showed lower values wicking. However, incorporation of glass waste to become more porous structure of mortar, but the size of pores was reduced with evidence of the formation of additional C-S-H by pozzolanic reactions. These results indicate a potential for the use of waste glass as a partial replacement of cement in mortar structural recovery, yet deserving, further research, especially with regard to the aspects of durability.

Keywords: windshield waste laminated glass, repair mortar, cementitious material, pozzolanic activity, mechanical properties.

SUMÁRIO

Capítulo 1

<i>Introdução</i>	20
1. Introdução	21
1.1 Objetivo	25
1.1.1 Objetivo geral	25
1.1.2 Objetivos específicos	26
1.2 Estrutura do trabalho	26

Capítulo 2

<i>Revisão Bibliográfica</i>	28
2. Revisão Bibliográfica	29
2.1 Estudos sobre argamassas de recuperação estrutural	30
2.1.1 Argamassas de recuperação estrutural à base de cimento Portland com sílica ativa	32
2.1.2 Argamassas de recuperação estrutural à base de cimento Portland com outras adições minerais	35
2.1.3 Considerações sobre argamassas de recuperação estrutural à base de cimento Portland com adições minerais	37
2.2 O Vidro	38
2.3 Processo de moagem do vidro laminado automotivo de parabrisas e obtenção do resíduo de vidro laminado usado neste estudo	41
2.4 Estudos de aplicação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias	42
2.4.1 Influência da granulometria do resíduo de vidro nas matrizes cimentícias	45
2.4.2 Influência da aplicação de resíduo de vidro nas propriedades das matrizes cimentícias no estado fresco	48
2.4.3 Influência da aplicação de resíduo de vidro nas propriedades das matrizes cimentícias no estado endurecido	49
2.4.3.1 Resistência à compressão	50
2.4.3.2 Módulo de elasticidade	52
2.4.3.3 Retração	53
2.4.3.4 Aderência	54
2.4.3.5 Absorção de água por capilaridade	55

2.4.4	Influência da aplicação de resíduo de vidro na microestrutura das matrizes cimentícias.....	56
2.4.5	Considerações sobre a influência da aplicação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias.....	59

Capítulo 3

	<i>Programa Experimental, Materiais e Métodos</i>	61
3.	Programa Experimental, Materiais e Métodos	62
3.1	Planejamento dos experimentos	63
3.1.1	Fatores constantes	64
3.1.2	Fatores controláveis	64
3.1.3	Variáveis de resposta	64
3.2	Programa experimental	65
3.3	Materiais.....	68
3.3.1	Agregado miúdo	68
3.3.2	Cimento	69
3.3.3	Resíduo de vidro laminado (RVL)	70
3.4	Métodos	74
3.4.1	Estudo de dosagem e preparo das argamassas	74
3.4.2	Ensaio no estado endurecido	77
3.4.2.1	Resistência à compressão axial	77
3.4.2.2	Módulo de elasticidade dinâmico	79
3.4.2.3	Retração linear	80
3.4.2.4	Resistência de aderência à tração	81
3.4.2.5	Absorção de água por capilaridade	82
3.4.3	Análise microestrutural	83
3.4.4	Análise estatística	84

Capítulo 4

	<i>Resultados e Discussões</i>	86
4.	Resultados e Discussões	87
4.1	Caracterização do resíduo de vidro laminado – RVL	88
4.1.1	Caracterização química	88
4.1.2	Caracterização física e mineralógica	89
4.1.3	Índice de atividade pozolânica	91
4.2	Ensaio realizado nas argamassas em estado fresco.....	96

4.2.1	Determinação do índice de consistência	96
4.2.2	Determinação da massa específica	97
4.3	Ensaio realizado nas argamassas em estado endurecido.....	98
4.3.1	Resistência à compressão axial	98
4.3.2	Módulo de elasticidade dinâmico	103
4.3.3	Retração linear	108
4.3.4	Resistência de aderência à tração	112
4.3.5	Absorção de água por capilaridade	116
4.4	Análise microestrutural das argamassas.....	120
Capítulo 5		
	<i>Conclusões e Considerações Finais</i>	129
5.	Conclusões e Considerações Finais	130
5.1	Conclusão geral	131
5.2	Conclusões específicas.....	131
5.2.1	Conclusões relativas à caracterização do resíduo de vidro laminado .	131
5.2.2	Conclusões relativas às argamassas de recuperação estrutural em estado fresco.....	132
5.2.3	Conclusões relativas às argamassas de recuperação estrutural em estado endurecido.....	133
5.3	Sugestões para futuros estudos	135
Referências		
	<i>Referências Normativas e Bibliográficas</i>	137
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS	137
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
Apêndices		
	<i>Resultados individuais dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido. Micrografias das argamassas</i>	144
	APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido.....	145
	APÊNDICE B – Micrografias das argamassas.....	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Vidros de parabrisas recebidos pela indústria de reciclagem	41
Figura 2.2 - Moinho para o vidro laminado	41
Figura 2.3 - Esteira do moinho onde ocorre a separação do vidro e PVB	42
Figura 2.4 - Resíduos de PVB (1º plano) e de vidro (2º plano) separados ao final da moagem	42
Figura 2.5 - Microscopias eletrônicas de varredura das partículas de cimento e resíduo de vidro	47
Figura 2.6 - Microscopias eletrônicas de varredura dos concretos de traço REF (esquerda) e S20 (direita), ampliadas em 5000 vezes	57
Figura 2.7 - Microscopias eletrônicas de varredura de argamassas referência (esquerda) e argamassa com incorporação de resíduo de vidro (direita), ampliadas em 5000 vezes	58
Figura 3.1 - Programa experimental – Geral	65
Figura 3.2 - Programa experimental – Caracterização do resíduo	66
Figura 3.3 - Programa experimental – Argamassas	67
Figura 3.4 - Curva de distribuição granulométrica da areia - NBR NM 248 (ABNT, 2003)	69
Figura 3.5 - Curva de distribuição granulométrica do cimento CP V ARI	69
Figura 3.6 - RVL ao chegar no LEMAC-UFES	71
Figura 3.7 - Preparação do RVL antes da sua caracterização e incorporação nas argamassas	71
Figura 3.8 - RVL após a moagem no moinho de argolas	72
Figura 3.9 - Curva de distribuição granulométrica do RVL	72
Figura 3.10 - Comparação das curvas de distribuição granulométrica do RVL e do cimento CP V ARI	73
Figura 3.11 - Misturador planetário utilizado na confecção das argamassas	76
Figura 3.12 - Determinação de consistência pelo espalhamento do tronco de cone na mesa	77
Figura 3.13 - Corpos de prova submetidos à cura imersos em água saturada com cal	78
Figura 3.14 - Ensaio para determinação da resistência à compressão axial	78
Figura 3.15 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico	79
Figura 3.16 - Aparelho usado para determinação da retração linear das argamassas	80
Figura 3.17 - Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas metálicas coladas aguardando a execução do ensaio de arrancamento	81
Figura 3.18 - Equipamento utilizado na execução do ensaio de arrancamento	82

Figura 3.19 - Corpos de prova imersos numa lâmina de água durante o ensaio	83
Figura 3.20 - Corpo de prova rompido para verificação da ascensão capilar	83
Figura 3.21 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado na pesquisa	83
Figura 4.1 - Micrografias obtidas por MEV das partículas de cimento e de RVL	90
Figura 4.2 - Difratoograma de raios-X do RVL	91
Figura 4.3 - Corpos de prova úmidos aos sete dias	93
Figura 4.4 - Resultados individuais de resistência à compressão para verificação do IAP-cim	94
Figura 4.5 - Resistência à compressão axial	99
Figura 4.6 - Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão axial	101
Figura 4.7 - Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre a resistência à compressão axial	101
Figura 4.8 - Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição de cimento por RVL sobre a resistência à compressão axial	102
Figura 4.9 - Micrografias obtidas com MEV das argamassas aos 270 dias	103
Figura 4.10 - Módulo de elasticidade dinâmico	105
Figura 4.11 - Efeito isolado da idade sobre o módulo de elasticidade dinâmico	106
Figura 4.12 - Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre o módulo de elasticidade dinâmico	106
Figura 4.13 - Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição de cimento por RVL sobre o módulo de elasticidade dinâmico	107
Figura 4.14 - Efeito isolado da idade sobre a retração linear	110
Figura 4.15 - Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre a retração linear	111
Figura 4.16 - Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição de cimento por RVL sobre a retração linear	112
Figura 4.17 - Corpos de prova após a execução do ensaio.....	114
Figura 4.18 - Efeito do teor de substituição de cimento por RVL sobre a resistência de aderência	115
Figura 4.19 - Ascensão capilar nos corpos de prova após 72 horas	117
Figura 4.20 - Efeito isolado do tempo, em horas, sobre a absorção de água por capilaridade	118
Figura 4.21 - Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre a absorção de água por capilaridade	119
Figura 4.22 - Efeito da interação entre os fatores tempo e teor de substituição de cimento por RVL sobre a absorção de água por capilaridade	119
Figura 4.23 - Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 0 (argamassa referência) em diferentes idades	121

Figura 4.24 - Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 7 em diferentes idades	123
Figura 4.25 - Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 13 em diferentes idades	124
Figura 4.26 - Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 20 em diferentes idades	125
Figura 4.27 - Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 26 em diferentes idades	127
Figura B.1.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 28 dias	166
Figura B.1.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 63 dias	167
Figura B.1.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 270 dias ..	168
Figura B.2.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 7 aos 28 dias	169
Figura B.2.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 7 aos 63 dias	170
Figura B.2.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 7 aos 270 dias	171
Figura B.3.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 13 aos 28 dias	172
Figura B.3.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 13 aos 63 dias	173
Figura B.3.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 13 aos 270 dias	174
Figura B.4.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 20 aos 28 dias	175
Figura B.4.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 20 aos 63 dias	176
Figura B.4.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 20 aos 270 dias	177
Figura B.5.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 26 aos 28 dias	178
Figura B.5.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 26 aos 63 dias	179
Figura B.5.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa ARE 26 aos 270 dias	180

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Estudos de aplicação do resíduo de vidro analisados nesta pesquisa.....	43
Quadro 3.1 - Nomenclaturas dos traços.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Composição química típica do vidro	38
Tabela 2.2 - Composição da mistura do vidro sodo-cálcico tipo <i>float</i> incolor	39
Tabela 2.3 - Índices de atividade pozolânica de acordo com a granulometria do resíduo de vidro	46
Tabela 2.4 - Composição química de diferentes tipos de resíduo de vidro	48
Tabela 3.1 - Caracterização da areia	68
Tabela 3.2 - Caracterização do cimento CP V ARI	70
Tabela 3.3 - Quantidade de materiais (em massa)	75
Tabela 4.1 - Composição química do RVL	89
Tabela 4.2 - Comparação das propriedades químicas do RVL com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992)	92
Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para verificação do IAP-cal	93
Tabela 4.4 - Resultados do ensaio para verificação do IAP-cim	95
Tabela 4.5 - Comparação das propriedades físicas do RVL com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992)	95
Tabela 4.6 - Resultados das consistências determinadas de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2005) para as argamassas no estado fresco	96
Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de massa específica no estado fresco	97
Tabela 4.8 - Valores médios de resistência à compressão axial das argamassas ...	99
Tabela 4.9 - Análise de variância do efeito da idade e do teor de resíduo sobre a resistência à compressão axial	100
Tabela 4.10 - Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas	104
Tabela 4.11 - Análise de variância do efeito da idade e do teor de resíduo sobre o módulo de elasticidade dinâmico	105
Tabela 4.12 - Valores médios de retração linear das argamassas	109
Tabela 4.13 - Análise de variância do efeito da idade e do teor de resíduo sobre a retração linear	109
Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência à tração nas argamassas	113

Tabela 4.15 - Análise de variância do efeito do teor de resíduo sobre a resistência de aderência	114
Tabela 4.16 - Valores médios de absorção de água por capilaridade das argamassas às 72 horas	116
Tabela 4.17 - Análise de variância do efeito do tempo em horas e do teor de resíduo sobre a absorção de água por capilaridade	117
Tabela A.1.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para a argamassa referência aos 7 e 28 dias	146
Tabela A.1.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para a argamassa referência aos 63 e 270 dias	147
Tabela A.1.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para a argamassa ARE 7 aos 7, 28, 63 e 270 dias	148
Tabela A.1.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para a argamassa ARE 13 aos 7, 28, 63 e 270 dias	149
Tabela A.1.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para a argamassa ARE 20 aos 7, 28, 63 e 270 dias	150
Tabela A.1.6 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial para a argamassa ARE 26 aos 7, 28, 63 e 270 dias	151
Tabela A.2.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico para a argamassa referência aos 28, 63 e 270 dias	152
Tabela A.2.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico para a argamassa ARE 7 aos 28, 63 e 270 dias	153
Tabela A.2.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico para a argamassa ARE 13 aos 28, 63 e 270 dias	154
Tabela A.2.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico para a argamassa ARE 20 aos 28, 63 e 270 dias	155
Tabela A.2.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico para a argamassa ARE 26 aos 28, 63 e 270 dias	156
Tabela A.3.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear para a argamassa referência aos 1, 7, 28 e 63 dias	157
Tabela A.3.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear para a argamassa para a argamassa ARE 7 aos 1, 7, 28 e 63 dias	158
Tabela A.3.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear para a argamassa para a argamassa ARE 13 aos 1, 7, 28 e 63 dias	159

Tabela A.3.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear para a argamassa para a argamassa ARE 20 aos 1, 7, 28 e 63 dias	160
Tabela A.3.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear para a argamassa para a argamassa ARE 26 aos 1, 7, 28 e 63 dias	161
Tabela A.4.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade para a argamassa referência	162
Tabela A.4.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade a argamassa ARE 7	162
Tabela A.4.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade a argamassa ARE 13	163
Tabela A.4.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade a argamassa ARE 20	163
Tabela A.4.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade a argamassa ARE 26	164

Capítulo 1

Introdução

1. Introdução

O mundo vive um modelo de desenvolvimento econômico que se tornou insustentável. Este desequilíbrio é causado pelo crescimento populacional aliado ao crescimento econômico mundial que tem como consequência o crescimento da sociedade de consumo. Sociedade que acreditava, até algum tempo atrás, que os recursos da Terra eram inesgotáveis, tanto para utilização destes, quanto para deposição dos resíduos gerados pelo consumo.

Hoje se sabe que é necessário mudar a forma de produção e consumo para que as gerações futuras disponham de recursos para a sobrevivência. Neste contexto insere-se o conceito de sustentabilidade e o modelo cíclico de produção e consumo. Este modelo objetiva a volta dos resíduos para o mesmo processo produtivo em que foram gerados, denominado de logística reversa, ou para fabricação de outros

produtos. Para John (2000) este é um modelo que busca a otimização dos recursos empregados e a redução da geração de resíduos a um mínimo reciclável.

De acordo com Calmon (2007), para que esta redução aconteça a gestão de resíduos deve ser baseada na prevenção dos resíduos, reciclagem e reuso, e na melhoria da disposição final. Sendo a prevenção o princípio mais importante, e apenas quando não for possível prevenir a produção dos resíduos é que estes devem ser reciclados ou reutilizados. A disposição em aterros deve ser utilizada como último recurso. A gestão dos resíduos deve seguir uma hierarquia, utilizada pela legislação relativa a este tema: reduzir a geração dos resíduos na fonte; reutilizar o resíduo; reciclar; incinerar, recuperando a energia; depositar em aterros sanitários (John, 2000).

Seguindo esta hierarquia, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), instituída no Brasil em 2010, dispõe sobre as diretrizes, os princípios, objetivos e instrumentos relativos ao gerenciamento de resíduos sólidos, além das responsabilidades dos geradores e do poder público quanto a esta gestão. Esta lei destaca a importância e incentiva a logística reversa, a não geração de resíduos, os programas de redução, reutilização e reaproveitamento destes, incluindo o aproveitamento energético, o tratamento dos resíduos e a destinação final ambientalmente adequada.

Dessa forma, observa-se o crescimento da busca pela reutilização dos resíduos gerados nos centros urbanos no intuito de poupar os recursos naturais e espaços urbanos. Uma vez que estes resíduos, quando não absorvidos pela indústria da reciclagem geralmente são direcionados a aterros sanitários, inutilizando o solo a eles destinado e promovendo a desertificação de milhares de metros quadrados.

Neste contexto, sabe-se que 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. Esta é também uma atividade econômica que consome grandes quantidades de recursos naturais e de energia, além de ser uma grande geradora 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 (John, 2000).

Dentre os diversos tipos de resíduos urbanos gerados, destacam-se os resíduos de vidro, que são descartados tanto na forma de embalagens, quanto na forma de vidros planos utilizados na construção civil, indústria automobilística, entre outras indústrias.

De acordo com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO (2010), o vidro é um material que pode ser reciclado indefinidamente, sem mudanças nas suas características. A reciclagem deste material permite reduzir os custos de produção, assim como a matéria-prima e energia gasta. No entanto, a eficiência da reciclagem depende da coleta e seleção do vidro de acordo com sua composição química. Se houver mistura de diferentes resíduos de vidro ou contaminação, este processo fica inviabilizado. O resíduo é então, direcionado a aterros ou utilizado para outros propósitos. Considerando o vidro um produto não biodegradável, que leva de 2 mil à 1 milhão de anos para se decompor, a deposição em aterros deve ser evitada (ABIVIDRO, 2010).

No Brasil, em 2011, estima-se que foram produzidas 3.000.000 toneladas de vidro, sendo destas 1.516.000 toneladas de vidros planos, utilizados principalmente pela construção civil e indústria automobilística. A produção de automóveis foi responsável pelo consumo de 10% da produção de vidros planos. A reciclagem de todos os tipos de vidro no Brasil ainda não é conhecida, por isso admite-se que o mínimo reciclado é o que provém das embalagens (47% da produção de vidros para embalagens são reciclados), logo a quantidade conhecida de vidro reciclado no país é de aproximadamente 18% da produção total (MME, 2012).

Por estes motivos o número de estudos sobre a utilização de resíduo de vidro incorporado a materiais de construção, principalmente em matrizes cimentícias, vem crescendo nos últimos anos. Estas pesquisas indicam a utilização deste resíduo como substituto parcial de agregados ou aglomerantes em concretos e argamassas. Porém, a maioria dos autores aponta melhores resultados quando este resíduo é utilizado na forma de pó, como substituto parcial do cimento, já que em granulometria fina (abaixo de 75 μ m) 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.

O presente estudo segue as linhas de pesquisa de Utilização de resíduos e subprodutos industriais como materiais de construção e Concretos e argamassas, abordando a aplicação do resíduo de vidro laminado de parabrisas moído como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação estrutural.

O resíduo de vidro laminado utilizado nesta pesquisa é gerado principalmente nos centros urbanos, advindo das indústrias automobilísticas. Este resíduo é proveniente de uma indústria de reciclagem de vidros situada em São Paulo, que recebe este material de refugos (parabrisas quebrados ou trincados) e após o processo de moagem destina este resíduo para indústrias de embalagens e aterros.

A própria composição do vidro laminado - duas chapas de vidro plano unidas por uma camada intermediária feita com um polímero orgânico denominado PVB (polivinilbutiral) - faz com que sua destinação após a vida útil se torne um problema ambiental, uma vez que durante o processo de moagem destes materiais os mesmos não se separam totalmente. Assim, o resíduo de vidro gerado após o processo é contaminado com pequenas partículas de PVB, reduzindo a possibilidade de reutilização deste resíduo na mesma cadeia produtiva. Entretanto, este material pode ser incorporado a outros processos produtivos, como na produção de materiais para a construção civil.

De acordo com a classificação dos resíduos proposta pela Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA¹ (BRASIL, 2002) e pela NBR 10004 (ABNT, 2004) o resíduo de vidro é considerado pertencente a Classe B, que são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros. Os resíduos pertencentes a esta classe devem ser reutilizados, reciclados ou armazenados temporariamente, de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura (BRASIL, 2002).

¹ As resoluções nº348 (BRASIL, 2004), nº 431 (BRASIL, 2011) e nº 448 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2012) são atualizações da resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2002) e alteram alguns artigos desta resolução, porém não alteram a classificação do resíduo de vidro.

A eliminação de custos com aterros e dos próprios aterros, diminuição da extração de matérias-primas, a economia de quantidade significativa de energia e a redução de poluentes emitidos a partir da produção do clínquer, estão entre alguns dos benefícios da utilização de resíduos de vidro em cimentos e concretos descritos por Shi e Zheng (2007).

Assim, esta pesquisa avaliou a influência da variação do teor de substituição (em massa) do cimento por resíduo de vidro laminado (7%, 13%, 20% e 26%, além da argamassa de referência) sobre algumas propriedades no estado fresco, trabalhabilidade e massa específica, e propriedades no estado endurecido, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, resistência de aderência à tração, retração linear e absorção de água por capilaridade, além da análise microestrutural das argamassas de recuperação estrutural.

A escolha deste tipo de argamassa para a incorporação do resíduo de vidro, veio da proposta de trabalhar com as características pozolânicas que este resíduo pode vir a apresentar em fina granulometria (abaixo de 75 μ m), podendo substituir algumas adições minerais já utilizadas em argamassas de recuperação estrutural, como a sílica ativa.

A hipótese desta pesquisa é que o resíduo de vidro laminado de parabrisas moído finamente possua propriedades pozolânicas e efeito *filler*, e que a incorporação deste resíduo a argamassa melhore algumas propriedades desta matriz cimentícia. Viabilizando assim, a aplicação deste resíduo como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação estrutural, contribuindo para uma possível mudança na destinação final do resíduo de vidro laminado de parabrisas.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em estudar o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado de parabrisas moído como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação estrutural destinadas à construção civil.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, podem ser relacionados:

- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro em argamassas no estado fresco através dos ensaios de índice de consistência e massa específica, comparando-as com as amostras sem substituição;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro, em idades variadas, sobre algumas propriedades mecânicas como a resistência à compressão axial, resistência de aderência à tração, módulo de elasticidade dinâmico e retração linear comparando-as com as amostras sem substituição;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro sobre a absorção de água por capilaridade, comparando-as com as amostras sem substituição;
- Avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro do ponto de vista microestrutural da argamassa através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), comparando-as com as amostras sem substituição.

1.2 Estrutura do trabalho

Esta dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas e dos apêndices e anexos. A seguir é apresentada uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 1 é introdutório e nele foram abordados a justificativa e a importância do tema escolhido para o estudo. Também são apresentados os objetivos geral e específicos da pesquisa, além da estrutura do trabalho produzido através desta.

No capítulo 2, a revisão bibliográfica apresenta o resíduo do vidro laminado em estudo e os processos para sua obtenção, os resultados alcançados por algumas

pesquisas já realizadas utilizando resíduo de vidro em matrizes cimentícias, e as principais características e propriedades exigidas das argamassas de recuperação estrutural.

O capítulo 3 expõe a metodologia do programa experimental, descrevendo as variáveis envolvidas na pesquisa, os materiais empregados e sua caracterização, incluindo o método de preparo do resíduo para torná-lo apto à aplicação neste estudo. Também constam neste capítulo as dosagens e os teores de substituição adotados para as argamassas estudadas, além do método de moldagem dos corpos de prova, dos ensaios em estado fresco e endurecido, e da obtenção das imagens para análise microestrutural das argamassas.

No capítulo 4 são apresentados, analisados estatisticamente e discutidos os resultados dos ensaios descritos no programa experimental. Também é apresentada a análise microestrutural das argamassas que ajudam a explicar e corroborar alguns destes resultados.

No capítulo 5 estão descritas as principais conclusões obtidas através das observações, resultados e análises feitas ao longo deste estudo. Além de algumas sugestões para trabalhos futuros de pesquisa nessa área a partir das lacunas encontradas durante esta pesquisa.

Por fim, são relacionadas as referências normativas e bibliográficas que auxiliaram na elaboração deste trabalho. Ao final do volume, são apresentados os apêndices e anexos pertinentes a este trabalho.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2. Revisão Bibliográfica

No capítulo anterior foram descritos a justificativa, a importância do tema estudado e os principais objetivos desta pesquisa, para uma compreensão inicial do tema. A estrutura do trabalho também foi brevemente descrita buscando um rápido entendimento do processo realizado.

Neste capítulo será apresentado um embasamento teórico, realizado por meio de revisão bibliográfica, com elementos que auxiliam no entendimento da problemática do tema abordado e na formulação dos objetivos e questionamentos deste trabalho. Dentre estes elementos estão o estudo das principais características e propriedades exigidas das argamassas de recuperação estrutural, a descrição do vidro e do processo de obtenção do resíduo estudado, além do estado da arte com estudos de reaproveitamento do resíduo de vidro em materiais de construção, enfatizando a utilização em concretos e argamassas.

2.1 Estudos sobre argamassas de recuperação estrutural

As estruturas de concreto armado são muito utilizadas em todo mundo. Porém, para manter a vida útil e o desempenho destas estruturas é necessário que o projeto estrutural e a execução sejam realizados de forma correta e que haja manutenção preventiva na fase de utilização. Quando existem falhas em algum destes momentos surgirá a necessidade de um procedimento de recuperação estrutural.

Existem dois tipos de manutenção nas estruturas de concreto: manutenção preventiva, quando o objetivo é antecipar ou identificar o surgimento de danos; e corretiva, quando a estrutura já apresenta perdas significativas e necessita de reparos que evitem o comprometimento da segurança da estrutura (ARANHA, 1994 apud GAIER, 2005).

O reparo de uma estrutura de concreto consiste em “[...] restabelecer as condições originais de segurança ou funcionalidade da estrutura, restaurando as características e corrigindo possíveis erros, conferindo atributos de durabilidade à estrutura” (GAIER, 2005, p. 39).

No Brasil, assim como em todo o mundo, há uma necessidade cada vez maior de reparo de estruturas de concreto armado. Porém, a carência de informações técnicas, diretrizes e consenso sobre procedimentos provocam uma série de divergências que interferem diretamente na obtenção de maior vida útil e durabilidade dos reparos (SILVA JUNIOR e HELENE, 2001).

De acordo com Bertolini (2010), nos últimos anos diversas organizações em todo o mundo redigiram recomendações e normas para recuperação de estruturas de concreto. Dentre elas está a série EN 1504, que é um conjunto de normas europeias que ainda estão sendo formuladas, referentes a execução de reparos.

O Brasil ainda não dispõe de normas específicas para reparos em estruturas de concreto, transferindo a responsabilidade dos trabalhos de reparo a experiência dos técnicos, ou usuários, que devido à variedade de técnicas e produtos existentes podem acabar fazendo escolhas inadequadas, e aos fabricantes, que tem dificuldade de padronizar as propriedades e níveis de desempenho dos produtos (PEÑA, 2004).

Os reparos mais antigos eram feitos com argamassa de cimento e areia produzida na obra. Atualmente, há uma gama de técnicas e produtos de reparo desenvolvidos especificamente para esta finalidade. Os reparos que utilizam produtos a base epóxi, argamassas industrializadas e com adições minerais são os mais difundidos (LATORRE, 2002; GAIER, 2005).

As argamassas de reparo mais comuns são constituídas principalmente de:

- Cimento: é o aglomerante principal, sendo que a escolha do tipo de cimento influencia diretamente na resistência a fissuração da argamassa;
- Agregado miúdo: o principal agregado miúdo é a areia, sua finura e granulometria interferem na dosagem do cimento, sua escolha adequada gera uma redução no consumo deste material;
- Aditivos plastificantes: sua principal função é reduzir a quantidade de água na mistura para a obtenção de uma mesma trabalhabilidade, e conseqüentemente obter uma redução da relação água/cimento;
- Aditivos retentores de água: a função destes aditivos é a de liberar gradativamente a água interna da argamassa à medida que a umidade do ambiente é reduzida (PEÑA, 2004).

Essas argamassas devem possuir baixa relação água/cimento e podem ser modificadas através da adição de outros componentes, tais como as adições minerais, polímeros, dentre outros, que ajudem a melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido. As argamassas de reparo podem ser feitas na obra ou industrializadas (misturas prontas), estas últimas são as mais utilizadas (HELENE, 1992; CABRAL, 2000).

De acordo com Silva Junior e Helene (2001) as propriedades consideradas básicas para que um material de reparo tenha bom desempenho ao longo de sua vida útil, são o módulo de elasticidade, retração e aderência ao substrato.

Porém, Medeiros (2005) e Carasek (2007), acrescentam que alguns outros requisitos também são importantes para o bom funcionamento deste sistema, tais como trabalhabilidade, resistência mecânica, alta resistência inicial e baixa permeabilidade e absorção de água (durabilidade).

As argamassas de reparo além de reconstituir geometricamente os elementos estruturais danificados também têm a função de proteger a estrutura. Além disso, estes materiais devem possuir propriedades que promovam a monoliticidade da estrutura recuperada, sendo indispensável à compatibilidade das propriedades físicas e químicas das argamassas de reparo com as do concreto onde serão aplicadas (GAIER, 2005; CARASEK, 2007).

Para Vaske, Campagnolo e Dal Molin (2008), um dos principais requisitos do sistema recuperado é a capacidade de funcionar como um todo, o que só pode ser alcançado com a aderência adequada entre o elemento pré-existente de concreto e o reparo. Essa aderência deve ser tal que a estrutura apresente um comportamento monolítico, com uma ligação resistente e durável.

Assim, como o objeto de estudo desta dissertação são as argamassas de recuperação estrutural com adições minerais, alguns estudos nesta área serão detalhados para melhor entendimento deste sistema.

2.1.1 Argamassas de recuperação estrutural à base de cimento Portland com sílica ativa

As argamassas inorgânicas à base de cimento Portland, em geral possuem incorporação de aditivos químicos e por isso apresentam baixa retração, característica muito importante para sua utilização em obras de recuperação de estruturas de concreto. Além disso, possuem resistência química e pH alcalino, restaurando o meio alcalino do concreto e permitindo a passivação da armadura. (CABRAL, 2000; GAIER, 2005).

Para melhorar as propriedades dessas argamassas em geral são utilizadas adições minerais como as cinzas volantes, escórias e sílica ativa. Nas argamassas de cimento Portland, a adição da sílica ativa pode proporcionar melhorias em suas características como alta resistência à compressão e baixa permeabilidade. A sílica ativa é a adição mineral mais utilizada neste tipo de argamassa (KORMANN, 2002; MEDEIROS 2005).

A sílica ativa é um subproduto derivado das indústrias de produção de silício metálico ou de ligas ferro-silício. A redução do quartzo em silício à temperaturas de até 2000°C produz vapores de SiO, que se oxidam e condensam na forma de partículas esféricas extremamente pequenas de sílica pura na forma amorfa, com diâmetro médio de 1µm e área superficial específica entre 15 e 25 m²/Kg. Esse é um material altamente pozolânico e sua utilização aumenta consideravelmente o consumo de água na mistura, levando, geralmente, a necessidade de utilizar grandes quantidades de aditivos redutores de água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com Kormann (2002), essa adição melhora as propriedades físicas e mecânicas da matriz cimentícia por meio de reações pozolânicas. Além disso, segundo Vaske, Campagnolo e Dal Molin (2008), reduz a permeabilidade atuando como um microfíler, com preenchimento de vazios ocupados pelas pequenas partículas de sílica que são 100 vezes menores que as de cimento, diminuindo a capilaridade e aumentando a densidade da matriz cimentícia.

A adição de sílica ativa também melhora a resistência à abrasão dos materiais cimentícios, pois reduz drasticamente a exsudação interna, diminuindo a porosidade da pasta, provocando maior coesão entre a pasta de cimento e os agregados (KORMANN, 2002; MEDEIROS 2005).

Mattos (2002) em seus estudos buscou avaliar o comportamento das argamassas cimentícias com adição de 10% de sílica ativa para reparos superficiais, dosadas em laboratório, através da comparação com argamassas industrializadas modificadas com adição de polímeros para o mesmo fim. Para isso, o autor executou ensaios que avaliaram as propriedades mecânicas e físicas das argamassas. Dentre essas propriedades estão: consistência, resistência à compressão e à tração, absorção de água por capilaridade e por imersão, retração livre e restringida, módulo de elasticidade e resistência à aderência.

Após estudar várias pesquisas de diferentes autores, e comparar os resultados e valores ideais de certas propriedades dos materiais de reparo com sílica ativa, Mattos (2002) percebeu que, a sílica ativa pode ser utilizada tanto como adição quanto em substituição à massa de cimento em argamassas de cimento Portland. Além disso, o uso da sílica ativa combinada com a incorporação de um aditivo

superplastificante reduz a permeabilidade das argamassas devido ao refinamento dos poros, melhorando a resistência da matriz, pois mantém a relação água/cimento baixa.

Este autor notou também que as relações cimento/agregado e água/cimento mais utilizadas eram, respectivamente, entre 1:2 e 1:3, e entre 0,3 à 0,7, a granulometria da areia variava de fina à média e a consistência, medida na mesa de consistência, no estado fresco de 180mm à 280mm.

Baseado nessas considerações Mattos (2002) adotou em sua pesquisa a consistência no estado fresco de 200 ± 10 mm e as seguintes relações:

- Para argamassas de cimento Portland com adição de 10% de sílica ativa produzida com areia normalizada do IPT, adotou a relação cimento/agregado de 1:2,5 e as relações água/cimento de 0,30, 0,35 e 0,40;
- Já para argamassas de cimento Portland com adição de 10% de sílica ativa produzida com areia quartzosa de jazida com módulo de finura de 1,51, adquirida no comércio local, adotou a relação cimento/agregado de 1:3 e a relação água/cimento de 0,40.

Após a realização dos ensaios Mattos (2002) concluiu que as argamassas com sílica ativa demonstraram um bom desempenho mecânico e compatibilidade com concretos usuais no mercado.

Al-Zahrani *et al.* (2003) avaliaram, além das propriedades mecânicas, os parâmetros relacionados a durabilidade de nove tipos de argamassas de recuperação à base de cimento Portland, dentre elas argamassas dosadas em laboratório sem nenhum tipo de adição, com adição de 5% de sílica ativa e argamassas industrializadas modificadas com adição de diferentes tipos de polímeros.

Para as argamassas de recuperação dosadas em laboratório, Al-Zahrani *et al.* (2003) adotaram os seguintes parâmetros:

- relação cimento/agregado de 1:2,5;
- relação água/cimento de 0,38.

Após os ensaios Al-Zahrani *et al.* (2003) notaram que os resultados de resistência à compressão aos 28 dias foram semelhantes para ambas as argamassas dosadas

em laboratório (referência e com adição de 5% de sílica ativa). Porém, há uma tendência de crescimento da resistência da argamassa com sílica ativa em idades mais avançadas, devido à ocorrência das reações pozolânicas. Ainda quanto ao desempenho mecânico, a argamassa com sílica ativa apresentou valores de módulo de elasticidade, também aos 28 dias, maiores que os valores entrados para a argamassa referência. Além disso, o comportamento quanto à retração por secagem foi similar para ambas as argamassas dosadas em laboratório, havendo um aumento na retração em relação ao tempo, sendo que a velocidade de crescimento da retração foi mais intensa até aos 28 dias e bastante lenta após esta idade.

Tendo em vista os parâmetros relacionados à durabilidade, Al-Zahrani *et al.* (2003) observaram que a incorporação de sílica ativa diminui a permeabilidade de cloretos da argamassa o que a torna mais eficiente na redução da corrosão da armadura. Além disso, a resistividade elétrica e taxa de carbonatação foram semelhantes para estas duas argamassas, sendo que após o período de exposição de 12 meses a taxa de carbonatação destas argamassas se manteve inferior a 10mm.

Vaske, Campagnolo e Dal Molin (2008), em suas pesquisas sobre a aplicação da argamassa com sílica ativa como material de reparo em elementos de concreto sujeitos a esforços de compressão, utilizou relações cimento/agregado e água/cimento semelhantes as utilizados por Mattos (2002), de 1:3 e 0,45, respectivamente, na produção das argamassas. Após ensaios de resistência à compressão em pilares reforçados com argamassa com sílica ativa, concluíram que nesta situação as propriedades mecânicas da argamassa não ficam muito evidentes. Porém, a adição de sílica ativa reduz consideravelmente a porosidade e permeabilidade da argamassa, melhorando os parâmetros relacionados a durabilidade, o que justifica a utilização deste material de reparo.

2.1.2 Argamassas de recuperação estrutural à base de cimento Portland com outras adições minerais

Ainda que menos utilizadas, as cinzas volantes também podem ser incorporadas como adição mineral a argamassas de recuperação estrutural. Felekoğlu *et al.*

(2006) compararam o comportamento no estado fresco e o desempenho mecânico de argamassas de recuperação com substituição de 20, 40 e 60% de cimento por cinzas volantes, utilizadas como material pozolânico (com índice de atividade pozolânica igual à 93,8%), com argamassas com os mesmos teores de substituição do cimento por pó calcário, utilizado como *filler*.

Adotando relação cimento/agregado de 1:1,2 e relação água/cimento de 0,25, Felekoğlu *et al.* (2006), observaram que a finura Blaine, a textura e a porosidade da superfície, a forma e o tamanho das partículas da adição mineral, afetam o desempenho das argamassas no estado fresco. Dessa forma, o aumento do teor destas adições influencia diretamente na trabalhabilidade das argamassas.

Ao contrário da sílica ativa, que tende a aumentar o consumo da água com o aumento do teor de incorporação, Felekoğlu *et al.* (2006) afirmam que a incorporação de cinzas volantes as argamassas de recuperação provocam uma redução no consumo de água melhorando a trabalhabilidade.

Quanto ao desempenho mecânico, Felekoğlu *et al.* (2006) notaram que os resultados de resistência à compressão inicial das argamassas de recuperação estrutural com pó calcário se apresentaram superiores aos encontrados para as argamassas com cinzas volantes. Contudo, após os 28 dias estes resultados se inverteram, o que se deve as reações pozolânicas provocadas pela incorporação das cinzas volantes.

Avaliando a viabilidade da aplicação de novos materiais considerados adições minerais em argamassas de recuperação estrutural, Borja *et al.* (2012) substituíram parcialmente, nas proporções de 5, 10, 15 e 20% além do traço padrão, o cimento por cinza de biomassa da cana-de-açúcar (CBC) em argamassas de recuperação.

Borja *et al.* (2012), adotaram as relações material cimentício/agregado e água/cimento iguais a 1:0,89 e 0,45, respectivamente, para todos os traços, baseados em uma pesquisa que analisou argamassas para concretos autoadensáveis com CBC. Com o intuito de avaliar a trabalhabilidade, a utilização de aditivos plastificante e superplastificante foi necessária para que a relação água/cimento fosse mantida constante.

Para a utilização da CBC, Borja *et al.* (2012) moeram o material de modo que sua finura se equiparasse a do cimento Portland (abaixo de 75 μm). Ao analisar a composição química observaram que este material possui alto potencial pozolânico, apresentando, aproximadamente, 78% de sílica amorfa em sua composição.

A incorporação da CBC aumentou a consistência e a fluidez das argamassas, mas não interferiu na massa específica. Com relação ao desempenho mecânico das argamassas de recuperação estrutural, Borja *et al.* (2012) observaram que não houve variações significativas entre os valores de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, que atingiram aos 28 dias valores próximos de 27 GPa. No entanto, a resistência à compressão variou de acordo com os diferentes teores, sendo que a argamassa com 15% de substituição foi a que apresentou os melhores resultados. Além disso, as argamassas com CBC se apresentaram menos porosas, o que Borja *et al.* (2012) atribuem a elevada finura do material que atua como microfíler refinando os poros e tornando a argamassa mais densa.

2.1.3 Considerações sobre argamassas de recuperação estrutural à base de cimento Portland com adições minerais

Ao analisar as pesquisas descritas anteriormente, notou-se que:

- Não existem normas brasileiras específicas para materiais de reparo em estruturas de concreto, dificultando a padronização das características, das propriedades e dos níveis de desempenho destes produtos;
- As principais propriedades que devem ser avaliadas ao se estudar argamassas de recuperação são: módulo de elasticidade, retração e aderência. Mas, a trabalhabilidade, resistência e permeabilidade também exercem um papel fundamental no desempenho destes materiais.
- As argamassas de recuperação devem possuir baixa relação água/cimento;
- A compatibilidade das propriedades físicas e químicas das argamassas de reparo com as do concreto onde serão aplicadas é de fundamental importância;

- A incorporação de adições minerais com características pozolânicas as argamassas de recuperação proporcionam melhorias no desempenho mecânico e nos parâmetros relacionados à durabilidade deste material.

2.2 O Vidro

Segundo Sichieri, Caram e Santos (2007), o vidro é um produto fisicamente homogêneo obtido pelo resfriamento de uma massa inorgânica em fusão, que enrijece sem cristalizar através do aumento contínuo de viscosidade, ou seja, é um material não cristalino, que apresenta transição vítrea. Este material é resultante da fusão pelo calor de óxidos inorgânicos ou seus derivados e misturas, tendo como constituinte principal a sílica (óxido de silício - SiO_2) como demonstrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição química típica do vidro

Material	%
Sílica (SiO_2)	72,0
Sódio (Na_2SO_4)	14,0
Cálcio (CaO)	9,0
Magnésio (MgO)	4,0
Alumina (Al_2O_3)	0,7
Potássio (K_2O)	0,3

Fonte: Adaptado de Guia do Vidro (2011)

A produção do vidro de sílica pura (areia) é muito cara, pois a temperatura de fusão do material é muito alta, entorno de 2000°C . A introdução de óxidos modificadores de cadeia, como os óxidos de metais alcalinos (sódio, potássio e lítio), reduz a temperatura de fusão deste material para aproximadamente 1600°C . Além disso, outros óxidos chamados de modificadores, como CaO , MgO e Al_2O_3 , são adicionados a mistura com o intuito de aumentar a resistência química e a resistência à devitrificação do vidro (SICHIERI, CARAM e SANTOS, 2007).

A Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro, a ABIVIDRO (2010) classifica o vidro em três tipos, de acordo com a sua composição química:

- Vidro sodo-cálcico ou silicato soda-cal: é o tipo de vidro mais comum, utilizado em embalagens de forma geral (garrafas, potes, entre outros) e como vidro plano, aplicado na indústria automobilística, construção civil e em eletrodomésticos. É constituído principalmente por sílica ou o óxido de silício (SiO_2), podendo sofrer pequenas variações em sua composição química, para modificação da cor ou de alguma propriedade específica;
- vidro boro-silicato: é utilizado em utensílios domésticos resistentes a choques térmicos por possuir baixa expansão térmica;
- vidro ao chumbo: é utilizado em peças que requerem maior brilho, função atribuída à adição de chumbo, como copos, taças, cálices, ornamentos, etc.

Os vidros coloridos são produzidos acrescentando-se corantes como o selênio (Se), óxido de ferro (Fe_2O_3) e cobalto (Co_3O_4) variando assim a composição química (GUIA DO VIDRO, 2011).

O vidro sodo-cálcico pode ser obtido pelo processo de fabricação *float* ou estirado, podendo ser beneficiado e transformado em materiais como o vidro curvo, temperado, laminado, espelho, entre outros. A mistura básica para fabricação deste tipo de vidro está apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição da mistura do vidro sodo-cálcico tipo *float* incolor

Mistura Vitrificável	Produtos minerais				Produtos químicos	
	SiO_2 (areia)	CaCO_3 (calcário)	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita)	$\text{Na}_2\text{O}.\text{Al}_2\text{O}_3$ (feldspato)	Na_2CO_3 (barrilha)	Na_2SO_3
100%	57,46%	10,56%	9,88%	2,96%	16,46%	2,96%

Fonte: Sichieri, Caram e Santos (2007, p. 659)

Quanto as suas características físicas, de acordo com Sichieri, Caram e Santos (2007), o vidro plano deve possuir:

- Massa específica = $2500 \pm 50 \text{ Kg/m}^3$;
- Dureza = $\pm 6,5$ Mohs;
- Módulo de elasticidade = $75.000 \pm 5000 \text{ MPa}$;
- Tensão de ruptura à flexão = $40 \pm 5 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson = 0,22;

- Coeficiente de Dilatação = $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$;
- Calor específico entre 20°C e 100°C = 0,19 Kcal/Kg°C;
- Coeficiente de condutibilidade térmica a 20°C = 0,8 a 1 Kcal/mh°C.

A NBR NM 293 – Terminologia de vidros planos e dos componentes acessórios a sua aplicação (ABNT, 2004), classifica os vidro planos como recozido, temperado, laminado, aramado e duplo ou insulado, de acordo com a forma de fabricação e aplicações.

O foco de estudo deste trabalho é o resíduo de vidro laminado. Considerado um vidro de segurança, o vidro laminado é constituído por um conjunto de duas ou mais chapas de vidro plano (sodo-cálcico) que são submetidas a um processo de laminação, onde são unidas por uma película plástica ou acrílica (ABIVIDROS, 2010). A película plástica mais utilizada é um polímero orgânico denominado polivinilbutiral (PVB), pois é um material resistente, com boa aderência ao vidro, boa elasticidade e que filtra até 99,6% dos raios ultravioletas. A ligação final filme-vidro, laminação, é obtida por tratamento térmico sob pressão (SICHERI, CARAM e SANTOS, 2007). Em caso de quebra, os cacos de vidro ficam presos a essa camada intermediária, garantindo a segurança do usuário (GUIA DO VIDRO, 2011).

O processo de fabricação do vidro laminado no Brasil deve seguir as determinações descritas nas normas: NBR 14697 – Vidro laminado (ABNT, 2001), no caso de vidros laminados aplicados na construção civil e na indústria moveleira, e NBR 9491- Vidros de segurança para veículos rodoviários — Requisitos (ABNT, 2011), no caso dos vidros automotivos de parabrisas. Estas normas especificam os requisitos gerais, métodos de ensaio, cuidados necessários para garantir a segurança e a durabilidade do vidro laminado em suas aplicações.

Após a vida útil, o vidro laminado deveria retornar para as indústrias fabricantes, já que estas são responsáveis pela destinação final do resíduo. Porém, algumas empresas optam por encaminhar os vidros quebrados ou trincados para uma usina de reciclagem especializada, onde ocorre a separação das camadas de vidro da película intermediária do PVB, através de processos de moagens, e a destinação final destes resíduos.

2.3 Processo de moagem do vidro laminado automotivo de parabrisas e obtenção do resíduo de vidro laminado usado neste estudo

O resíduo utilizado neste estudo resulta do processamento do vidro laminado automotivo de parabrisas através de moagem, por uma usina de reciclagem especializada, situada em São Paulo, que recebe os vidros de parabrisas quebrados ou trincados das empresas de venda e troca de vidros para reposição em veículos.

Na usina de reciclagem, o vidro laminado é armazenado separado dos outros tipos de vidro (figura 2.1), pois seu processamento é feito em moinhos específicos (figura 2.2). Ao passar pelas esteiras dos moinhos, durante o processo de moagem, o vidro vai se soltando da lâmina de PVB, como visto na figura 2.3. Esse processo é repetido até que as partículas de vidro se desprendam quase que totalmente dessa lâmina, e devido essa repetição o resíduo de vidro resultante possui grande variabilidade granulométrica. Além disso, ainda possui pequenas partículas de PVB agregadas e por este motivo, após este processo o resíduo de vidro tem destinação restrita, indústrias de embalagens ou aterros.

Já a lâmina de PVB, apesar de transparente quando aplicada ao vidro, após a moagem, apresenta-se opaca e em pedaços de diferentes tamanhos com pequenas partículas de vidro ainda presas a lâmina. Ao final da separação o PVB triturado é colocado em *containers* para ser descartado em aterros (figura 2.4).

Figura 2.1 - Vidros de parabrisas recebidos pela indústria de reciclagem.



Fonte: Cortesia de Massfix (2012)

Figura 2.2 – Moinho para o vidro laminado



Fonte: Cortesia de Massfix (2012)

Figura 2.3 – Esteira do moinho onde ocorre a separação do vidro e PVB



Fonte: Cortesia de Massfix (2012)

Figura 2.4 – Resíduos de PVB (1º plano) e de vidro (2º plano) separados ao final da moagem



Fonte: Cortesia de Massfix (2012)

Logo, o processo de obtenção do resíduo de vidro laminado pode ser considerado simples, sendo a moagem o único procedimento de transformação adotado pela indústria de reciclagem. Em 2010, o resíduo de vidro laminado produzido por esta usina de reciclagem de São Paulo era vendido por R\$40,00/tonelada, sendo a maior parte deste resíduo ainda é destinada a aterros.

2.4 Estudos de aplicação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias

A incorporação de resíduo de vidro a materiais de construção, principalmente em matrizes cimentícias vem sendo foco de muitos estudos. Estas pesquisas apontam o potencial de utilização deste resíduo como substituto parcial ou adição, na forma de agregados, aglomerantes ou pozolanas, em argamassas e concretos. Resultados satisfatórios têm sido encontrados, tanto nas propriedades das matrizes, quanto pelo fato de consumir quantidade significativa do material que seria descartado.

Diversos tipos de resíduos de vidro vêm sendo estudados, uma vez que as composições individuais dos vidros são variadas, pois alterações são feitas para proporcionar propriedades específicas. Entretanto, a grande quantidade de sílica é comum na composição de todos os tipos de vidro, pois é a base deste material.

Assim, para entender melhor as possíveis formas de aplicação do resíduo de vidro em matrizes cimentícias e a interferência deste resíduo nas propriedades que serão estudadas nesta dissertação, ajudando na formulação da hipótese, foram analisadas

algumas pesquisas que estudaram tipos diferentes de resíduo de vidro em variadas formas de aplicação. Buscou-se priorizar o uso em argamassas, porém não foram encontrados estudos com utilização do resíduo de vidro em argamassas de recuperação estrutural. O quadro 2.1 sintetiza estes estudos:

Quadro 2.1 - Estudos de aplicação do resíduo de vidro analisados nesta pesquisa

Autores	Características	Produto final da pesquisa
Concretos		
Lam, Poon e Cham (2007)	Cimento: CP (BS 12) Teor substituição: 50% Traço: 1:1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,47	Concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro e adições minerais
Ismail e Al-Hashmi (2009)	Cimento: CP I (ASTM C150) Teor substituição: 10%, 15% e 20% Traço: 1:1,88:2,68 (volume) Relação água/cimento: 0.53	Concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Antônio (2012)	Cimento: CP V ARI RS Teor substituição: 5, 10,15 e 20% Traço: 1:2,05:2,79 (massa) Relação água/cimento: 0,51	Concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Nassar e Soroushian (2012)	Cimento: CP I (ASTM C150) Teor substituição: 20% Traço: 1:1,39:2,03 (volume) Relação água/cimento: 0,38 e 0,50	Concretos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Argamassas		
Park e Lee (2004)	Cimento: CP I Teor substituição: 10, 20, 30, 50 e 100% Traço:1:2,25 (massa) Relação água/cimento: 0,47	Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro e adição de fibras
Corinaldesi <i>et al.</i> (2005)	Cimento: CEM II/A-L 42,5R (EM 197/1) Teor substituição: 30 e 70% Traço: 1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,56, 0,67 e 1	Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro
Shi <i>et al.</i> (2005)	Cimento: CP I (ASTM C150) Teor substituição: 20% Traço: 1:2,75 (massa) Relação água/cimento: 0.465 à 0.485	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Barroso <i>et al.</i> (2010)	Cimento: CP IV-32 Teor substituição: 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 50%, 75% e até 100% Traço: 1:3 e 1:2,48:2,70 (massa) Relação água/cimento: 0,48 e 0,47	Argamassas e concretos com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro
Paiva <i>et al.</i> (2010)	Cimento: CP I 32 Teor substituição: 10%, 15% e 20% Traço: 1:2 (massa) Relação água/cimento: 0,40	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica

Quadro 2.1 (continuação) - Estudos de aplicação do resíduo de vidro analisados nesta pesquisa

Autores	Características	Produto final da pesquisa
Salomão <i>et al.</i> (2010)	Cimento: CP II E 32 Teor: 10% e 20% (adição); 5% (substituição) Traço: 1:4 (volume) Relação água/cimento: 0,85	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro e adição de resíduo de vidro
Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010)	Cimento: CEM I 52,5R Teor substituição: 20 e 40% Traço: 1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,6	Argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Araújo <i>et al.</i> (2011)	Cimento: CP V ARI Teor substituição: 10% Traço: 1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,60	Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Wang (2011)	Cimento: CP I (ASTM C150) Teor substituição: 10, 20, 30, 40 e 50% Traço: 1:2,75 Relação água/cimento: 0,485	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro
Khmiri, Samet e Chaabouni (2012)	Cimento: CP I 42,5N (ASTM C150/4) Teor substituição: 0 à 30% Traço: 1:3 Relação água/cimento: 0,517	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica e adição de sílica ativa
Ling e Poon (2012)	Cimento: CP I 52,5R Teor substituição: 50 e 100% Traço: 1:2,5 (volume) Relação água/cimento: 0,45	Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro
Matos e Souza-Coutinho (2012)	Cimento: CEM I 42,5R (EN 197/1) Teor substituição: 10 e 20% Traço: 1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,5	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Penacho (2012)	Cimento: CEM II/B-L 32,5 N Teor substituição: 20, 50 e 100% Traço: 1:4 (volume) Relação água/cimento: 1,19	Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro
Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	Cimento: CEM I 42,5R (EN 197/1) Teor substituição: 10, 20, 25, 30, e 40% Traço: 1:3 (massa) Relação água/cimento: 0,5	Argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro com alta atividade pozolânica
Du e Tan (2013a; 2013b)	Cimento: CP I Teor substituição: 25, 50, 75 e 100% Traço: 1:2,75 e 1:2,25 (massa) Relação água/cimento: 0,485 e 0,47	Argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro e adições minerais
Cimento		
Sobolev <i>et al.</i> (2007)	Cimento: CEM I 42,5 (EN 197/1) Teor substituição: 50% Traço: 1:2,75 Relação água/cimento: 0,45 e 0,30	Eco-cimento com substituição de 50% do clínquer por resíduo de vidro

2.4.1 Influência da granulometria do resíduo de vidro nas matrizes cimentícias

As pesquisas analisadas nesta dissertação avaliaram a aplicação do resíduo de vidro como substituto parcial do agregado miúdo ou do material cimentício. De acordo com Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010), o tamanho das partículas de vidro é um parâmetro importante que deve ser controlado, pois influencia nas principais propriedades da matriz cimentícia, já que a incorporação do vidro a essa matriz pode promover uma reação deletéria conhecida como reação álcali-sílica (RAS), que provoca fissurações na matriz, influenciando o desempenho mecânico e a durabilidade da mesma.

Autores como Corinaldesi *et al.* (2005), Ismail e Al-Hashmi (2009), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Araújo *et al.* (2011) observaram que em matrizes cimentícias com incorporação de resíduo de vidro de granulometria inferior a 100 µm as expansões por RAS foram controladas. Entretanto, outros autores como Shi *et al.* (2005), Sobolev *et al.* (2007), Paiva *et al.* (2010), Salomão *et al.* (2010), Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Ling e Poon (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) afirmam que as expansões devido a RAS são controladas apenas quando o resíduo de vidro é utilizado em fina granulometria, ou seja, partículas menores que 75µm.

Nesta faixa granulométrica, o resíduo de vidro se torna um inibidor da RAS, pois devido a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição, quando dividido em pequenas partículas este resíduo passa a apresentar alta atividade pozolânica². Esta característica é confirmada por Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e

² Mehta e Monteiro (2008) definem a pozolana como um material silicoso ou silico-aluminoso, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, finamente dividida e na presença de umidade, reage quimicamente com hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades cimentantes. A reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é chamada reação pozolânica, cujos produtos são muito eficientes em preencher espaços capilares, melhorando, assim, a resistência e impermeabilidade da matriz cimentícia.

Essa reação ocorre lentamente, com uma redução da liberação de calor de hidratação, ocasionando menos problemas de fissuração. Além disso, por consumir o hidróxido de cálcio ao invés de produzi-lo, contribui para o aumento da durabilidade da pasta endurecida.

Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) que após a realização de ensaios para determinação do índice de atividade pozolânica aos 28 dias com diferentes tipos de resíduo de vidro em variadas granulometrias, encontraram valores superiores ao mínimo de 75% estabelecido pela norma brasileira para materiais pozolânicos – NBR 12653 (ABNT, 1992), como visto na tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Índices de atividade pozolânica de acordo com a granulometria do resíduo de vidro

PESQUISAS	GRANULOMETRIA DO RESÍDUO DE VIDRO	ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA AOS 28 DIAS
Shi <i>et al.</i> (2005)	Tamanho médio de 80 μm e $\leq 60 \mu\text{m}$	92% e 110%
Paiva <i>et al.</i> (2010)	Tamanho médio de 5 μm	104%
Khmiri, Samet e Chaabouni (2012)	$\leq 40 \mu\text{m}$	85%
Matos e Souza-Coutinho (2012)	$\leq 75 \mu\text{m}$	90%
Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	$\leq 75 \mu\text{m}$	85%

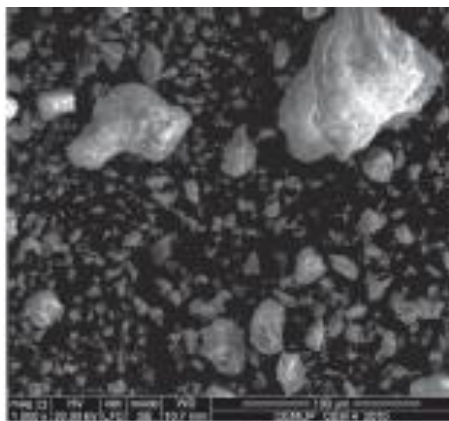
Fonte: Acervo Pessoal

De acordo com Shi *et al.* (2005), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) quanto menor o tamanho das partículas de vidro maior será o índice de atividade pozolânica deste material. Além disso, para Penacho (2012), o resíduo de vidro moído em partículas muito pequenas pode vir a apresentar o efeito *filler*, ou seja, os finos presentes no material se posicionam entre as partículas de cimento, preenchendo os vazios dos poros. Esse fenômeno físico provoca a diminuição do teor de vazios que ocorre enquanto não se iniciam as reações pozolânicas.

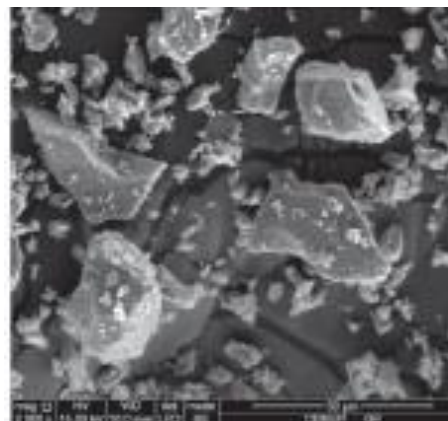
Ainda quanto ao tamanho da partícula do resíduo de vidro, Shi *et al.* (2005) observaram que ao moer este resíduo para equiparar sua distribuição granulométrica com a do cimento, o resíduo de vidro passou a apresentar a superfície específica pelo método Blaine maior que a do cimento, o que estes autores atribuem a maior irregularidade da partícula de vidro. Essa morfologia das partículas de vidro também foi observada por Paiva *et al.* (2010) e Matos e Souza-Coutinho (2012). A figura 2.5 mostra, apesar da variação de ampliação das imagens microestruturais, a maior irregularidade das partículas de resíduo de vidro em

relação as partículas de cimento notada por Matos e Souza-Coutinho (2012) em seu estudo.

Figura 2.5 – Microscopias eletrônicas de varredura das partículas de cimento e resíduo de vidro



a) Cimento - ampliação 1000x



b) Resíduo de vidro - ampliação 2000x

Fonte: Matos e Souza-Coutinho (2012, p. 208)

Quando utilizado como substituto do cimento, algumas outras características devem ser observadas no resíduo de vidro. Além das características físicas, o teor de alguns compostos químicos devem ser avaliados para que essa substituição não induza a expansão causada pela RAS.

Ao avaliar a composição química dos resíduos de vidro analisados em suas pesquisas, Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) observaram um alto teor de álcalis (Na_2O), acima dos limites estabelecidos pelas normas para materiais pozolânicos, como pode ser visto na tabela 2.4. Porém, apesar deste alto conteúdo alcalino, os autores constataram que a expansão devido à reação álcali-sílica (RAS) foi significativamente reduzida com a incorporação do resíduo de vidro nas argamassas. Matos e Souza-Coutinho (2012) explicam esse resultado afirmando que o consumo do álcali na formação do C-S-H durante a reação pozolânica antecede a RAS, não sobrando álcali suficiente para induzir essa reação deletéria. Observações semelhantes foram feitas por Shi *et al.* (2005) em suas pesquisas.

Tabela 2.4 – Composição química de diferentes tipos de resíduo de vidro

Óxidos	Teores (%)			
	Matos e Souza-Coutinho (2012)	Khmiri, Samet e Chaabouni (2012)	Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)	Limite estabelecido pela NBR12653 (ABNT, 1992) para materiais pozolânicos
SiO ₂	70,00	71,48	74,07	
Al ₂ O ₃	1,20	1,60	2,57	≥70
Fe ₂ O ₃	0,65	0,07	Não informado	
CaO	8,70	11,45	11,53	Não informado
MgO	3,70	1,23	0,75	Não informado
K ₂ O	0,35	0,48	1,14	Não informado
SO ₃	< 0.05	0,27	Não informado	≤5
Na ₂ O	16,00	13,36	9,94	≤1,5

Fonte: adaptado de Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012)

2.4.2 Influência da aplicação de resíduo de vidro nas propriedades das matrizes cimentícias no estado fresco

As propriedades da matriz cimentícia, argamassa ou concreto, no estado fresco interferem significativamente no desempenho ao longo da vida útil do sistema, uma vez que várias propriedades da matriz no estado endurecido serão afetadas pelas condições de aplicação deste material no estado fresco, podendo comprometer até a sua durabilidade.

Segundo Carasek (2007), a trabalhabilidade é uma propriedade complexa, que resulta da junção de diversas outras propriedades como consistência e massa específica, entre outras.

A consistência é a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas, e geralmente é determinada pela relação água/cimento, podendo ser alterada com o uso de aditivos (CARASEK, 2007).

De acordo com Dal Molin (2011) o consumo de água das matrizes cimentícias com adições minerais vai depender da forma e superfície específica de suas partículas. As adições de extrema finura, como é o caso da sílica ativa, tendem a aumentar o

consumo de água com o aumento da porcentagem adicionada ou substituída, ou seja, quanto maior o teor de incorporação da adição menor a trabalhabilidade da mistura.

Este fato foi confirmado por Wang (2011) que, ao substituir parcialmente o cimento por resíduo de vidro, observou a redução da consistência das argamassas na medida em que aumentou o teor de resíduo de vidro nas misturas.

Outros autores encontraram resultados diferentes quanto à consistência das argamassas com substituição do cimento por resíduo de vidro. Salomão *et al.* (2010) e Matos e Souza-Coutinho (2012) observaram um acréscimo na consistência com o aumento do teor de resíduo de vidro. Entretanto, Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) não notaram diferenças significativas entre a consistência das argamassas referência e as outras misturas com diferentes percentuais de resíduo de vidro.

Ainda avaliando as propriedades das argamassas no estado fresco, Penacho (2012) e Du e Tan (2013a) ao substituir parcialmente o agregado miúdo por resíduo de vidro notaram que houve uma tendência de queda da massa específica das misturas com o aumento do teor de resíduo de vidro. Segundo Carasek (2007), massa específica dos materiais compósitos é uma função das massas específicas dos seus materiais constituintes. Assim, como a massa específica dos resíduos de vidro estudados é menor que a massa específica da areia, esse fato é justificado.

2.4.3 Influência da aplicação de resíduo de vidro nas propriedades das matrizes cimentícias no estado endurecido

As propriedades no estado endurecido determinam o comportamento do material ao longo de sua vida útil, influenciando diretamente na durabilidade da matriz cimentícia. Neste item serão apresentados estudos referentes à influência da incorporação do resíduo de vidro nestas propriedades de concretos e argamassas, como resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração, aderência e absorção de água por capilaridade.

2.4.3.1 Resistência à compressão

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a resistência é a capacidade de um material resistir a uma tensão sem se romper, sendo esta a propriedade mais valorizada por projetistas e engenheiros para o controle de qualidade da matriz cimentícia. Esta propriedade é inversamente proporcional a porosidade da mistura, que sofre uma grande influência da relação água/cimento adotada.

Normalmente, a resistência à compressão axial é aceita como um índice geral da resistência da matriz cimentícia, pois acredita-se que a partir deste valor é possível deduzir os outros tipos de resistência, bem como módulo de elasticidade, impermeabilidade da matriz, entre outras propriedades (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Sobolev *et al.* (2007) ao analisar a resistência à compressão do eco-cimento produzido a partir da substituição parcial de clínquer por resíduo de vidro notaram que os melhores resultados foram atribuídos aos cimentos com 50% de substituição. Este material também apresentou aumento de resistência à compressão aos 28 dias em relação ao cimento Portland comum, fato que foi atribuído a ocorrência de reações pozolânicas.

Antônio (2012) ao substituir variados teores (0, 5, 10, 15 e 20%) de cimento por resíduo de vidro em concretos, observou que a incorporação do resíduo de vidro afetou negativamente a resistência à compressão das amostras nas idades iniciais. Porém, aos 28 dias, houve um acréscimo de resistência no concreto com 15% de substituição, chegando a um valor próximo a resistência à compressão do concreto referência. Nesta idade, todos os resultados foram satisfatórios, pois mesmo sendo inferiores ao concreto referência, superaram o valor de resistência à compressão axial fixado de 30 MPa.

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 foi avaliada por Barroso *et al.* (2010) nas idades de 14 e 28 dias. Todos os traços com substituição apresentaram resistência à compressão inferior ao traço referência.

Sendo o teor limite encontrado de 20% de vidro moído em substituição ao agregado miúdo natural.

Estes resultados confirmam as conclusões dos estudos realizados por Park e Lee (2004), que ao avaliar a resistência à compressão de argamassas com substituição de 0, 10, 20, 30, 50 e 100% do agregado miúdo natural por resíduo de vidro moído, também observaram a queda da resistência com o aumento no teor de substituição, sobretudo para teores acima de 20% de substituição. Concluíram que esta queda estava ligada as expansões devidas a RAS por isso utilizaram, com sucesso, adições minerais para inibir esta reação.

Shi *et al.* (2005) ao avaliar o efeito da finura do pó de vidro sobre as propriedades das argamassas observaram que, em substituições de até 20% de cimento por resíduo de vidro em variadas granulometrias, quanto mais fino este resíduo se apresenta, melhor o resultado de resistência à compressão das argamassas. Sendo que as argamassas com substituição do cimento por resíduo de vidro com partículas abaixo de 40 µm apresentaram resultados de resistência à compressão superiores aos encontrados para argamassa referência aos 28 dias. Estudos similares foram feitos por Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012), que também concluíram que quanto menor a partícula do resíduo utilizado maior o valor de resistência à compressão das argamassas.

Dessa forma, ao utilizar um resíduo de vidro ultrafino como substituto parcial do cimento em argamassas, em teores de até 20% de substituição, Paiva *et al.* (2010) observaram que a resistência à compressão das argamassas com resíduo de vidro tende a aumentar em idades mais avançadas, superando a resistência da argamassa referência aos 56 dias, confirmando a alta atividade pozolânica do resíduo de vidro ultrafino. Matos e Souza-Coutinho (2012) fizeram observações semelhantes em argamassas com até 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro em massa, em ensaios de resistência à compressão realizados aos 90 dias.

Entretanto, Salomão *et al.* (2010), observaram que a incorporação do resíduo de vidro, tanto em substituição de 5% da massa de cimento quanto como adição de 10 e 20%, não provocou variações significativas nos resultados de resistência à compressão.

Wang (2011), ao estudar argamassas com até 50% de substituição (em massa) de cimento por resíduo de vidro, observou que aos 28 dias as argamassas com até 20% de substituição apresentaram valores de resistência próximos aos valores encontrados para argamassa referência, já para argamassas com teores acima de 20%, houve um decréscimo significativo nos valores de resistência à compressão. Resultados semelhantes foram encontrados por Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), em argamassas com até 30% de substituição de cimento por resíduo de vidro.

A partir destes resultados, Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) concluíram que a queda da resistência de argamassas com maiores teores de resíduo de vidro pode ser devida a ocorrência da RAS. Assim, adicionaram sílica ativa como uma adição mineral pozolânica à mistura para inibir esta reação deletéria.

Seguindo esta mesma hipótese, Du e Tan (2013a; 2013b), ao encontrar valores de resistência à compressão para argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro inferiores aos valores obtidos para argamassa referência, incorporaram às argamassas com substituição diferentes tipos de adições minerais. Ao final das pesquisas concluíram que as cinzas volantes e escória de alto forno foram as adições mais eficientes quanto a inibição da RAS, pois reduziram a alcalinidade da mistura e diminuíram a porosidade e permeabilidade da argamassa.

2.4.3.2 Módulo de elasticidade

As deformações da matriz cimentícia ocorrem como resultado da reação do material à carga externa e ao ambiente, levando normalmente a fissuração deste. O aumento da rigidez e da resistência da matriz cimentícia está diretamente ligado ao aumento do módulo de elasticidade e a diminuição da resiliência do material, ou seja, da capacidade deste material se deformar sem que ocorra a fissuração (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Antônio (2012) ao avaliar a influência da substituição de até 20% de cimento por resíduo de vidro em concretos sobre o módulo de elasticidade aos 28 dias encontrou valores médios variando de 30 a 32 GPa. Apesar da variação pouco significativa,

observou-se uma tendência de aumento do módulo de elasticidade como aumento do teor de substituição do cimento por resíduo de vidro.

Paiva *et al.* (2010), ao analisar o módulo de elasticidade em argamassas com os mesmos teores de substituição do cimento por resíduo de vidro, na mesma idade que Antônio (2012), também observaram o acréscimo do módulo de elasticidade com o aumento no teor de substituição, com resultados variando entre 31 e 35 GPa.

Penacho (2012) ao substituir até 100% do agregado miúdo natural por resíduo de vidro em argamassas observou que houve uma tendência de crescimento do módulo de elasticidade com o aumento do teor de resíduo para argamassas com até 50% de substituição, acima deste percentual houve um decréscimo nos valores obtidos para módulo de elasticidade, apresentando valores inferiores aos encontrados para a argamassa referência. Analisando argamassas com características semelhantes, Du e Tan (2013a) notaram que todas as argamassas com substituição apresentaram valores de módulo de elasticidade ligeiramente inferiores aos da argamassa referência. Porém, ao avaliar outras propriedades relacionadas ao desempenho mecânico das argamassas Du e Tan (2013a) concluíram que esta foi a propriedade menos afetada pela incorporação do resíduo de vidro.

2.4.3.3 Retração

A ocorrência de fenômenos patológicos em diversas partes das construções pode está diretamente relacionada à retração dos compósitos à base de cimento. A fissuração causada pela retração é um dos fenômenos que pode comprometer a durabilidade do sistema (BASTOS, 2001),

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a remoção da água adsorvida da pasta de cimento hidratada, em condições de baixa umidade relativa, é a principal causa da deformação da matriz cimentícia devido à retração por secagem.

Este tipo de retração está diretamente ligado a perda de água dos poros capilares. Assim, como as adições minerais tendem a causar o refinamento dos poros, concretos e argamassas com adições normalmente apresentam maior retração por secagem (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Wang (2011) ao avaliar a retração por secagem de argamassas com substituição de até 50% do material cimentício por resíduo de vidro, durante 56 dias, observou que argamassas com até 30% de substituição mantiveram os valores de retração similares aos da argamassa referência. A partir deste percentual as argamassas passaram a apresentar maiores valores de retração, confirmando a afirmação de Mehta e Monteiro (2008) para matrizes cimentícias com adições minerais.

Penacho (2012) ao analisar durante 90 dias a retração por secagem de argamassas com substituição de até 100% de agregado miúdo natural por resíduo de vidro também observou um acréscimo na retração com o aumento do teor de resíduo de vidro. No entanto, Ling e Poon (2012) e Du e Tan (2013a) ao analisar argamassas com as mesmas características e durante o mesmo tempo que as argamassas estudadas por Penacho (2012) observaram que o aumento do percentual de resíduo de vidro nas argamassas acarretou em diminuição da retração.

De acordo com Penacho (2012), quanto menor o módulo de elasticidade maior a deformabilidade e, portanto, menor a restrição a variação dimensional da argamassa, ou seja, argamassas com menores valores de módulo de elasticidade tendem a apresentar maiores valores de retração.

2.4.3.4 Aderência

A aderência não é uma propriedade muito estudada em matrizes cimentícias com incorporação de resíduo de vidro, já que o principal foco destes estudos são as propriedades relativas ao concreto, não abordando, geralmente, as propriedades principais das argamassas. Segundo Carasek (2007, p. 872), a aderência é “a propriedade que permite a argamassa absorver tensões normais ou tangenciais na superfície de interface com o substrato”.

Esse é um fenômeno essencialmente mecânico que ocorre, principalmente, devido à penetração da pasta aglomerante da argamassa no estado fresco nos poros ou entre as rugosidades do substrato. Ao entrar em contato com a superfície do substrato, parte da água de amassamento da argamassa contendo em dissolução os componentes do aglomerante, penetra pelos poros do substrato. No interior

desses poros, ocorre a formação dos produtos de hidratação do cimento, dentre eles a etringita, que depois de algum tempo exercem a função de ancoragem da argamassa ao substrato. Sendo a etringita a responsável pelo intertravamento da argamassa endurecida ao substrato, e conseqüentemente pela boa aderência entre estes materiais (CARASEK, 2007).

Dentre os estudos analisados, apenas Penacho (2012) avaliou essa propriedade. Após a análise dos resultados obtidos nos ensaios de arrancamento, Penacho (2012) concluiu que a aderência ao substrato diminui com o aumento da substituição de areia por resíduos de vidro até cerca de 50% de substituição, a partir deste percentual a aderência da argamassa ao substrato aumenta, resultados coerentes com os obtidos em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, uma vez que quando maior o módulo de elasticidade maior a rigidez da argamassa.

2.4.3.5 Absorção de água por capilaridade

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) o tamanho e a continuidade dos poros capilares determinam a permeabilidade de uma matriz cimentícia. Essa propriedade está diretamente ligada à durabilidade das argamassas, pois a água, juntamente com íons agressivos, é responsável por alguns processos de deterioração. Esses fenômenos são associados ao transporte de água pelos poros, que são controlados pela permeabilidade da matriz. Logo, a redução da permeabilidade pode melhorar significativamente o desempenho ao longo da vida útil de uma matriz cimentícia. A permeabilidade de uma matriz cimentícia pode ser determinada através do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Ling e Poon (2012) e Du e Tan (2013a) notaram que a absorção de água por capilaridade diminuiu com o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural por resíduo de vidro nas argamassas, ou seja, as argamassas com resíduo de vidro apresentaram-se menos permeáveis. Entretanto, Penacho (2012) notou um acréscimo linear na absorção de água por capilaridade das argamassas com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro.

Salomão *et al.* (2010) analisaram a permeabilidade de argamassas tanto com substituição parcial do cimento, quanto com adição de resíduo de vidro. Concluíram que, as argamassas com substituição apresentaram um decréscimo na absorção de água por capilaridade. No entanto, as argamassas com adição de resíduo de vidro mostraram-se mais permeáveis. Por outro lado, Matos e Souza-Coutinho (2012) não notaram variações significativas na absorção de água por capilaridade das argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro.

Ao analisar outros ensaios relativos a durabilidade dos concretos e argamassas Nassar e Soroushian (2012) e Matos e Souza-Coutinho (2012) afirmaram que a incorporação do resíduo de vidro em granulometria fina (abaixo de 75 μ m) melhorou os parâmetros associados a durabilidade das matrizes cimentícias.

2.4.4 Influência da aplicação de resíduo de vidro na microestrutura das matrizes cimentícias

As relações microestrutura-propriedades das matrizes cimentícias devem ser estudadas a fim de auxiliar no entendimento das propriedades mecânicas e de durabilidade, já que as alterações encontradas na avaliação destas propriedades podem ter origem na microestrutura do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2008) as principais fases sólidas na pasta de cimento hidratada que podem ser analisadas em um microscópio eletrônico de varredura são:

- O silicato de cálcio hidratado, C-S-H - por corresponder a aproximadamente 50% do volume de sólidos, é a fase mais importante e a que determina as propriedades. Sua morfologia varia de fibras pouco cristalinas a redes reticulares, com tendência a aglomerações;
- o hidróxido de cálcio ou portlandita, Ca(OH)₂ - são grandes cristais com um morfologia prismática hexagonal, podendo variar a pilhas de grandes placas. Tem influência relativamente baixa na resistência, se comparado ao C-S-H; e
- o sulfoaluminato de cálcio – durante os estágios iniciais da hidratação do cimento favorece a formação da etringita, formando cristais prismáticos

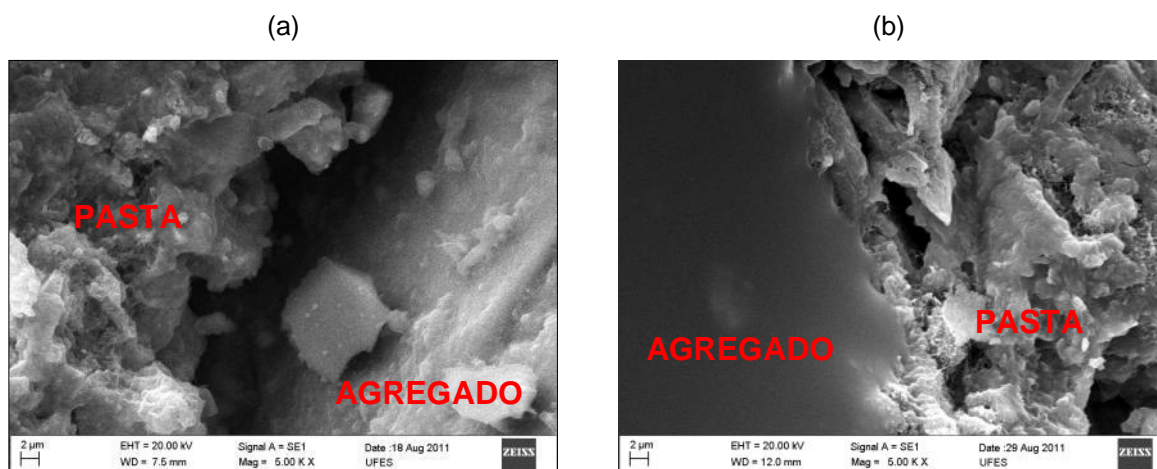
aciculares. Em pastas de cimento, a etringita pode se transformar em monossulfato hidratado, cristais de placas hexagonais.

A etringita e o hidróxido de cálcio são as primeiras fases sólidas a ser formar. Estes cristais tendem a evoluir para o C-S-H através das reações de hidratação. O C-S-H tende a ocupar os vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução, tornando a estrutura mais densa e, conseqüentemente, aumentando a resistência da matriz cimentícia (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

As adições minerais podem produzir alterações na quantidade e na ordem de formação destas fases sólidas. O efeito químico das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio para formação silicato de cálcio hidratado adicional, ou seja, estas adições tendem a melhorar a resistência das pastas de cimento hidratada (DAL MOLIN, 2011).

Ao analisar a microestrutura, Antônio (2012) observou que os concretos não apresentaram qualquer tipo de fissuração que denotasse a formação de um gel de características excessivamente expansivas gerado pela RAS. Além disso, ao comparar micrografias do concreto referência e do concreto com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro, notou o efeito da incorporação do resíduo no preenchimento das zonas de transição dos concretos, como mostrado na figura 2.6.

Figura 2.6 – Microscopias eletrônicas de varredura dos concretos de traço REF (a) e S20 (b), ampliadas em 5000 vezes

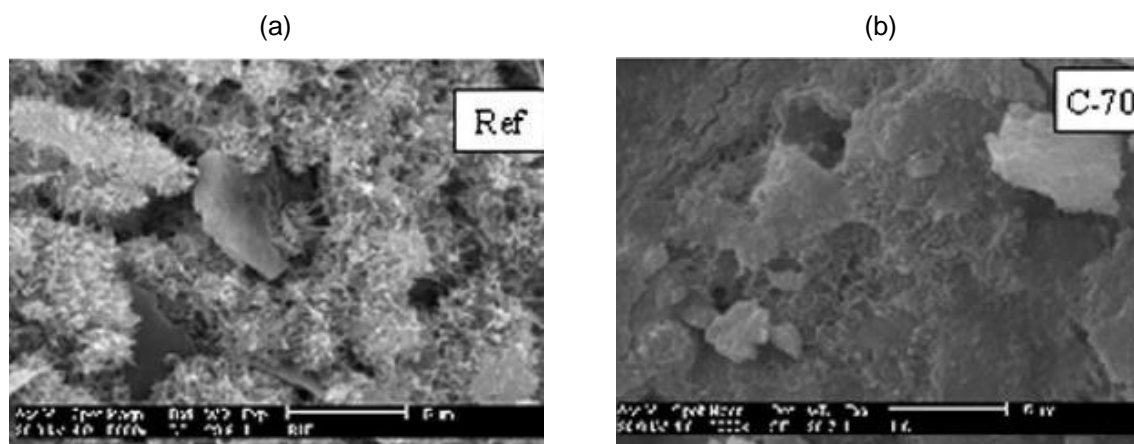


Fonte: Antônio (2012, p. 129)

Nassar e Soroushian (2012) atribuem a melhora na resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro a formação de uma estrutura mais densa, consequência do preenchimento dos poros por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, formado através das reações pozolânicas causadas pela incorporação do resíduo de vidro no concreto.

Corinaldesi *et al.* (2005) ao analisar imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, concluíram que a substituição do agregado miúdo do resíduo de vidro nas argamassas tornou a estrutura destas mais densa, como visto na figura 2.7.

Figura 2.7 – Microscopias eletrônicas de varredura de argamassas referência (a) e argamassa com incorporação de resíduo de vidro (b), ampliadas em 5000 vezes



Fonte: Corinaldesi *et al.* (2005, p. 200)

Esta também foi a conclusão de Wang (2011) ao analisar imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura de argamassas com a substituição do cimento por resíduo de vidro.

Entretanto, para Sobolev *et al.* (2007), além da estrutura mais densa e com baixa porosidade, a principal diferença entre a microestrutura da argamassa referência e da argamassa com incorporação de vidro é a diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio, já que este composto é consumido durante a reação pozolânica para formação de C-S-H adicional. Observações semelhantes foram feitas Matos e Souza-Coutinho (2012), acrescentando que as reações pozolânicas entre os compostos do vidro e do cimento ligam o álcali a pasta tornando-o indisponível para

a RAS, o que explica a diminuição da expansão devido a RAS com o aumento no teor de vidro.

Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) observaram a presença de gel expansivo resultante da RAS em argamassas produzidas com resíduo de granulometria maior que 100 μm . Porém, em argamassas produzidas com resíduo de granulometria fina (abaixo de 75 μm) os efeitos da RAS não foram observados, pois a reação pozolânica inibe a RAS no caso de partículas finas de vidro. Além disso, a inserção de resíduo de vidro na argamassa diminui a permeabilidade e a mobilidade iônica. De fato, a formação de C-S-H adicional por meio da reação pozolânica provoca aumento da densidade da estrutura levando à diminuição da porosidade e da permeabilidade, além do aumento significativo da resistência das argamassas.

2.4.5 Considerações sobre a influência da aplicação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias

Ao analisar as pesquisas descritas anteriormente, notou-se que:

- Em fina granulometria (abaixo de 75 μm), o resíduo de vidro se torna um inibidor da RAS, pois devido a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição este resíduo passa a apresentar alta atividade pozolânica quando dividido em pequenas partículas;
- Ao equiparar a distribuição granulométrica do resíduo com a do cimento, o resíduo de vidro tende a apresentar a maior superfície específica pelo método Blaine, devido a maior irregularidade da partícula de vidro;
- Ao avaliar a composição química do resíduo de vidro deve-se atentar ao teor de álcalis (Na_2O), pois altos teores deste composto podem induzir a reação alcalí-sílica que produz expansões deletérias a matriz cimentícia;
- A consistência da mistura tende a diminuir com o aumento do teor de resíduo de vidro devido a maior superfície específica e a maior irregularidade da partícula de vidro;

-
- Há uma tendência de queda da massa específica das misturas no estado fresco com o aumento do teor de resíduo de vidro devido ao baixo valor de massa específica deste resíduo em comparação a areia e ao cimento;
 - Alguns autores como Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Wang (2011) Antônio (2012) e Matos e Souza-Coutinho (2012) concluíram que substituições de até 20% de cimento por resíduo de vidro foram as que produziram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico das matrizes cimentícias;
 - A resistência à compressão das argamassas com incorporação de resíduo de vidro tende a aumentar em idades mais avançadas, devido a alta atividade pozolânica deste material;
 - O módulo de elasticidade foi a propriedade mecânica menos afetada pela incorporação do resíduo de vidro em matrizes cimentícias;
 - A retração por secagem tende a aumentar com o aumento do teor de substituição, sobretudo teores elevados (acima de 30%) devido ao refinamento dos poros capilares consequente da incorporação do resíduo de vidro;
 - Por este mesmo motivo a permeabilidade da matriz cimentícia, absorção de água por capilaridade, tende a diminuir com o aumento do teor de resíduo de vidro substituído;
 - A incorporação do resíduo de vidro torna a estrutura das matrizes cimentícias mais densa, devido ao preenchimento dos poros por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional formado através das reações pozolânicas.

Assim, o resíduo de vidro finamente moído pode ser considerado uma adição pozolânica com efeito *filler*, e segundo Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) possui um grande potencial para substituir materiais como a sílica ativa e as cinzas volantes em matrizes cimentícias.

Capítulo 3

Programa Experimental, Materiais e Métodos

3. Programa Experimental, Materiais e Métodos

No capítulo anterior a revisão bibliográfica foi apresentada como fundamentação teórica, para embasar cientificamente e tecnicamente esta dissertação. Ao analisar essa revisão bibliográfica, identificou-se a utilização do resíduo de vidro incorporado em argamassa de recuperação estrutural como uma nova possibilidade de aplicação deste resíduo em materiais de construção.

Tendo, então, como objetivo geral avaliar o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado (RVL) como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação estrutural, hipóteses foram levantadas e verificadas por meio de um programa experimental.

Assim, este capítulo apresenta o planejamento de experimentos utilizado como guia desta pesquisa. Este planejamento engloba tanto a da caracterização dos materiais e definição dos procedimentos experimentais e como os métodos adotados para a obtenção dos resultados, visando atingir os objetivos propostos.

O programa experimental desta dissertação buscou avaliar propriedades consideradas básicas para o bom desempenho de um material de reparo, envolvendo ensaios no estado fresco, como determinação do índice de consistência e massa específica, e no estado endurecido, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, retração ou expansão linear, resistência de aderência à tração e absorção de água por capilaridade, além de análises de imagens da microestrutura das argamassas produzidas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo (LEMAC-UFES) e no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais também do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo.

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

3.1 Planejamento dos experimentos

A metodologia utilizada com a finalidade de otimizar o planejamento, execução e análise de um experimento é conhecida como projeto de experimentos. Esta metodologia permite estruturar a pesquisa através de uma sequência de ensaios buscando traduzir o objetivo previamente estabelecido, embasada principalmente em conceitos estatísticos (RIBEIRO e CATEN, 2010).

Durante o planejamento de experimentos são definidos quais os parâmetros que devem permanecer constantes (fatores constantes) e os que podem ser alterados (fatores controláveis) ao longo da pesquisa, a fim de obter as variáveis de resposta, ou seja, os aspectos que permitem quantificar as características de qualidade do produto final (RIBEIRO e CATEN, 2010).

3.1.1 Fatores constantes

Para possibilitar a comparação entre os traços avaliados, foram adotados como fatores constantes:

- a) relação água/cimento – 0,4;
- b) relação material cimentício/agregado – 1:3 (em massa);
- c) índice de consistência - 200 ± 10 mm;
- c) origem dos materiais;
- d) procedimento de moagem e a granulometria do resíduo;
- e) preparação, moldagem e cura dos corpos de prova.

Estes parâmetros não serão estatisticamente analisados por não causarem variações na comparação dos sistemas.

3.1.2 Fatores controláveis

Os fatores controláveis, ou seja, os parâmetros do processo que foram eleitos para serem estudados em vários níveis no experimento foram:

- a) teor de substituição do cimento por resíduo de vidro laminado (RVL) – 0, 7, 13, 20 e 26% em relação à massa de cimento;
- b) idade – 7, 28, 63, 270 dias (variando de acordo com a propriedade avaliada).

3.1.3. Variáveis de resposta

As variáveis de resposta desta pesquisa foram relativas a algumas propriedades consideradas básicas para o bom desempenho das argamassas avaliadas, sendo mensuráveis e quantitativas. Dessa forma, foram elas:

- a) trabalhabilidade;
- b) massa específica no estado fresco;

- c) resistência à compressão axial;
- d) módulo de elasticidade dinâmico;
- e) retração linear;
- f) resistência de aderência à tração;
- g) absorção de água por capilaridade.

3.2 Programa experimental

Para atingir o objetivo desta pesquisa, foi estabelecido um programa experimental dividido em três etapas, como demonstrado na figura 3.1:

Figura 3.1 – Programa experimental - Geral



Fonte: Acervo Pessoal

Os ensaios, tanto de caracterização dos materiais quanto das argamassas, procederam-se aleatoriamente, porém, os maquinários utilizados e operadores mantiveram as mesmas sistemáticas.

O resíduo de vidro laminado (RVL) foi submetido a uma série de testes, a fim de determinar suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. A figura 3.2 apresenta um organograma das fases de caracterização do resíduo dentro do programa experimental desta pesquisa.

Figura 3.2 – Programa experimental – Caracterização do resíduo



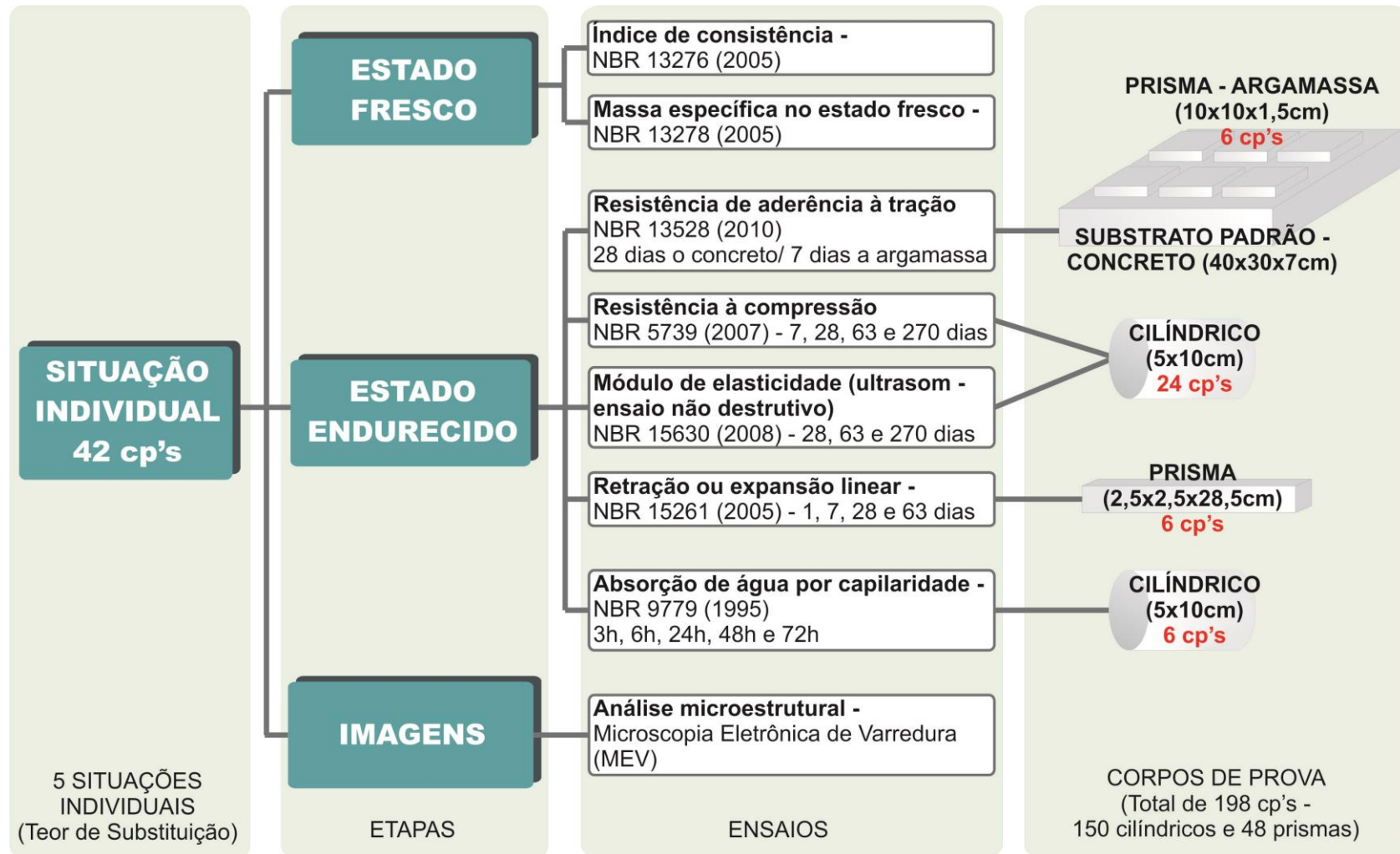
Fonte: Acervo Pessoal

Foram planejadas 5 misturas, com relação água/cimento e cimento/agregado constantes e iguais à 0,4 e 1:3, respectivamente. Os traços variaram de acordo com o teor de substituição do cimento por RVL, que foram de 0, 7, 13, 20 e 26%. Estes parâmetros foram determinados a partir da revisão bibliográfica baseados em autores como Mattos (2002), Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Wang (2011), Antônio (2012), Borja *et al.* (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012).

O procedimento experimental desta pesquisa visa estudar o potencial de aplicação resíduo de vidro laminado em argamassas avaliando suas propriedades como substituto de parte da massa de cimento em argamassas de recuperação estrutural. Para isso, os materiais e métodos aplicados foram selecionados de modo a atender a normatização brasileira referente a cada uma das características e metodologias de ensaios exigidas, no intuito de tornar válido o estudo apresentado nesta dissertação. Sabendo que no Brasil não existem normas para avaliação das propriedades das argamassas de recuperação estrutural optou-se por seguir a metodologia de ensaios utilizada por Mattos (2002), que em seus estudos comparou argamassas de recuperação industrializadas com argamassas de recuperação com sílica ativa produzidas em laboratório.

O organograma com os ensaios realizados nas argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido, descritos no programa experimental, e o número de corpos de prova utilizados são apresentados na figura 3.3.

Figura 3.3 – Programa experimental – Argamassas



Nota: O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado apenas nos traços com 0, 13 e 26 % de substituição do cimento por RVL.

Fonte: Acervo Pessoal

3.3 Materiais

Para a execução das argamassas de recuperação estrutural e a moldagem dos 198 corpos de prova necessários à execução do procedimento experimental, a origem e as características dos materiais utilizados foram mantidas constantes possibilitando a comparação entre os traços avaliados. Os materiais utilizados foram: areia quartzosa, cimento Portland CP V ARI, água potável fornecida pela concessionária local (CESAN), aditivo plastificante concentrado à base de resinas naturais e livre de cloretos, e resíduo de vidro laminado de parabrisas automotivos (RVL), proveniente de uma usina de reciclagem de São Paulo.

3.3.1 Agregado miúdo

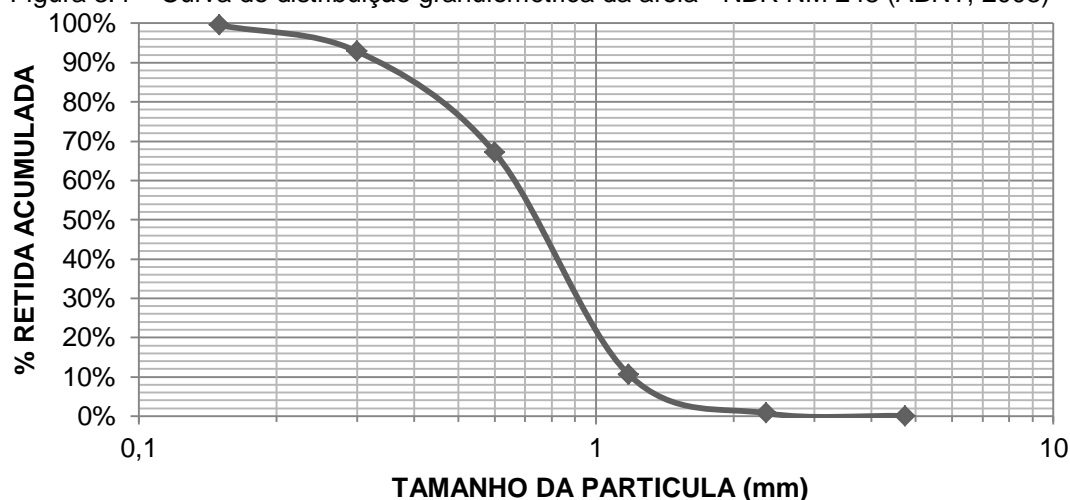
Como agregado miúdo foi utilizado a areia quartzosa natural extraída de jazida adquirida no mercado da região da Grande Vitória, classificada de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009) dentro do limite da zona ótima com módulo de finura igual a 2,71. Os ensaios para a caracterização física desta areia foram realizados de acordo com as normas correspondentes a cada propriedade no LEMAC-UFES; seus resultados estão descritos na tabela 3.1. A curva da distribuição granulométrica pode ser observada na figura 3.4.

Tabela 3.1 - Caracterização da areia

Propriedades	Métodos de ensaio	Resultados
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,71
Abaixo da peneira # 200 (%)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0%
Massa Específica (g/cm ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62
Material Pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	0,27%
Matéria Orgânica	NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais escura

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 3.4 – Curva de distribuição granulométrica da areia - NBR NM 248 (ABNT, 2003)

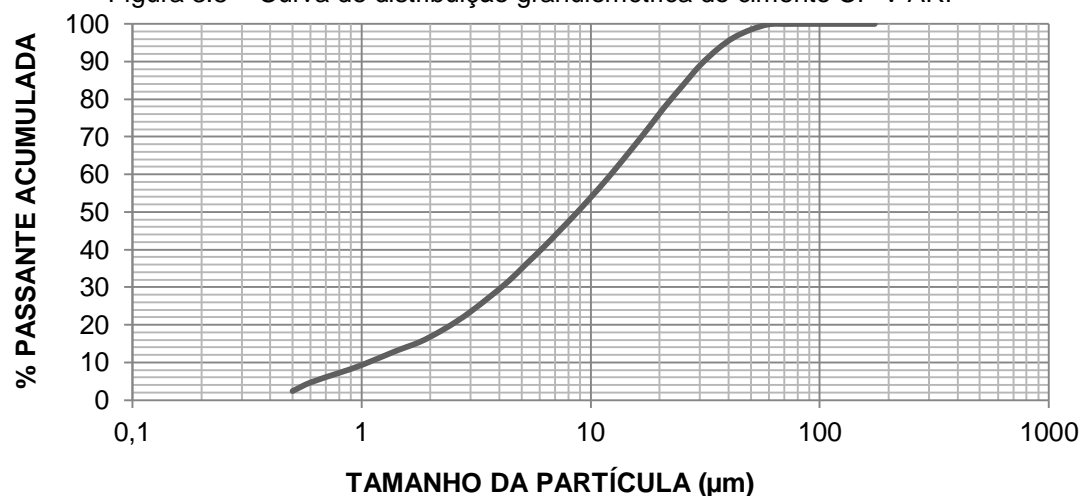


Fonte: Acervo Pessoal

3.3.2 Cimento

O cimento utilizado na confecção das argamassas foi do tipo Portland de alta resistência inicial – CP V ARI de acordo com a norma NBR 5733 (ABNT, 1991). Esse cimento foi escolhido por apresentar um alto desempenho e conter menor teor de adições, entre os disponíveis no mercado nacional, possibilitando avaliar mais claramente os efeitos das substituições do cimento pelo RVL. A caracterização física e química, e a distribuição granulométrica do cimento utilizado nesta pesquisa foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na figura 3.5 e na tabela 3.2.

Figura 3.5 – Curva de distribuição granulométrica do cimento CP V ARI



Fonte: Cortesia de Cimentos Holcim (2012)

Tabela 3.2 - Caracterização do cimento CP V ARI

Propriedades	Teores	Método de Ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Análises físicas			
Massa específica (g/cm ³)	3,05	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	4767	NBR NM 76 (ABNT, 1998)
	Finura - resíduo na peneira 400#	2,1	NBR 9202 (ABNT, 1985)
Tempos de Pega	Início de Pega (min)	133	NBR NM 65 (ABNT, 2003)
	Fim de Pega (min)	187	NBR NM 65 (ABNT, 2003)
Análises químicas			
	Perda ao fogo - PF (%)	3,68	NBR NM 18 (ABNT, 2004)
	SiO ₂ (%)	19,21	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	CaO (%)	63,58	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	MgO (%)	0,78	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	Al ₂ O ₃ (%)	5,15	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	Fe ₂ O ₃ (%)	2,90	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	K ₂ O (%)	0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	SO ₃ (%)	2,76	NBR 14656 (ABNT, 2001)
	Resíduo Insolúvel - RI (%)	0,92	NBR NM 15 (ABNT, 2004)
Resistência à compressão			
	1 dia (MPa)	27,9	NBR 7215 (ABNT, 1997)
	3 dias (MPa)	39,3	NBR 7215 (ABNT, 1997)
	7 dias (MPa)	44,2	NBR 7215 (ABNT, 1997)

Nota 1: N.E. – Não especificado

Nota 2: Os dados relativos ao cimento CP V ARI foram cedidos pela empresa fabricante, correspondente ao lote do cimento utilizado.

Fonte: Cortesia de Cimentos Holcim (2012)

3.3.3 Resíduo de vidro laminado (RVL)

O resíduo de vidro utilizado neste estudo é proveniente de parabrisas de veículos e foi cedido por uma usina de reciclagem de vidro localizada em São Paulo. 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. As amostras deste resíduo de vidro laminado (RVL) foram recebidas no LEMAC-UFES em tambores de 200 litros como visto na figura 3.6.

Figura 3.6 – RVL ao chegar no LEMAC-UFES



Fonte: Acervo Pessoal

O resíduo apresentava alta variabilidade granulométrica e estava parcialmente compactado dentro dos tambores, sendo necessária a preparação deste material antes da sua caracterização e incorporação nas argamassas. Essa preparação aconteceu em três etapas, como descrito na figura 3.7.

Figura 3.7 – Preparação do RVL antes da sua caracterização e incorporação nas argamassas



Fonte: Acervo Pessoal

Após a homogeneização e o quarteamento, o RVL foi seco em estufa por 24h à 110°C e depois moído em um moinho de argolas durante 40 segundos cada fração de 50 gramas de resíduo. A metodologia desse processo foi determinada de forma que a finura do RVL se equiparasse com a finura do cimento Portland determinada

pela NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) - Método de ensaio (ABNT, 1991), como demonstrado na figura 3.8.

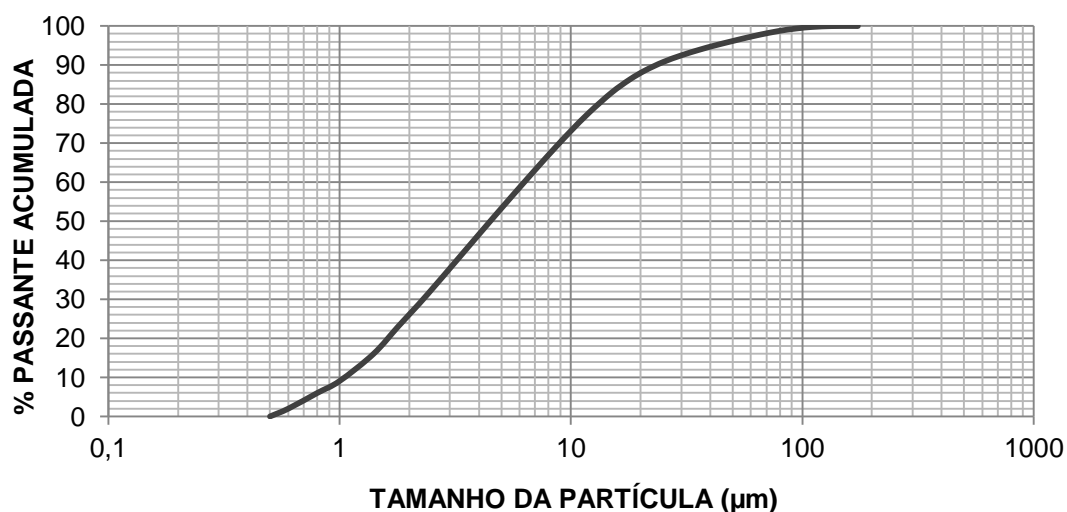
Figura 3.8 – RVL após a moagem no moinho de argolas



Fonte: Acervo Pessoal

Após este processo, o resíduo foi armazenado dentro sacos plásticos vedados em câmara seca. A partir daí os ensaios de caracterização foram realizados. Inicialmente, o resíduo foi submetido a uma análise de granulometria a laser (granulômetro *Sympatech*), possibilitando a constatação de que 98% das partículas estão abaixo de 75 μm , sendo que 90% são menores que 25 μm , como mostra a curva granulométrica na figura 3.9.

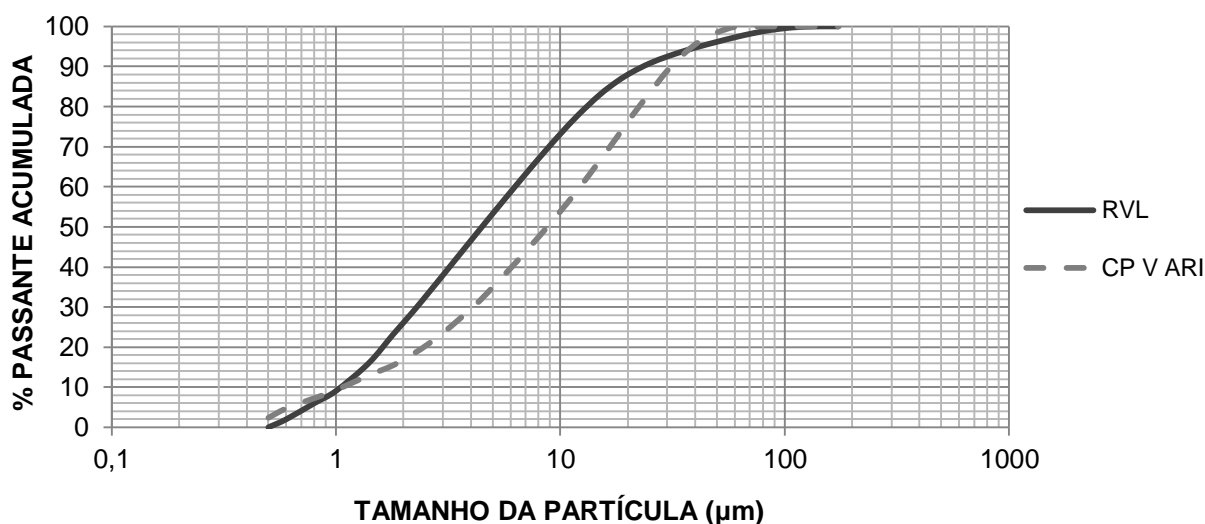
Figura 3.9 – Curva de distribuição granulométrica do RVL



Fonte: Acervo Pessoal

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), obtendo-se o valor de 2,31 g/cm³. A superfície específica foi determinada pelo método de Blaine, normatizado pela NBR NM 76 (1998) e apresentou 7833 cm²/g, bem mais fino que o cimento utilizado, que possui superfície específica de 4767 cm²/g. A figura 3.10 mostra a comparação entre o tamanho das partículas do RVL e do cimento através da sobreposição das duas curvas granulométricas. Todos os ensaios para caracterização física do RVL foram realizados no LEMAC-UFES.

Figura 3.10 – Comparação das curvas de distribuição granulométrica do RVL e do cimento CP V ARI



Fonte: Acervo Pessoal

A análise química do RVL foi feita pelo 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 de 110°C, foi aquecido até 1000°C por 60 minutos.

Já a análise mineralógica 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, e as imagens microestruturais no microscópio eletrônico de varredura (MEV) 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.

3.4 Métodos

Através da revisão bibliográfica foram estabelecidas as dosagens a serem adotadas, bem como os teores de substituição e selecionados os ensaios para a determinação das propriedades das argamassas de recuperação estrutural.

3.4.1 Estudo de dosagem e preparo das argamassas

Estudos realizados com a incorporação de diferentes resíduos de vidros moídos em argamassas mostraram que a substituição de até 20% do material cimentício por resíduo de vidro produziu os melhores resultados. Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Matos e Souza-Coutinho (2012), por exemplo, encontraram melhores resultados no desempenho mecânico de argamassas com até 20% de substituição. Com o intuito de confirmar este desempenho, os teores de substituição adotados nesta pesquisa serão de 7, 13, 20 e 26% do material cimentício³, além da argamassa referência. Os diferentes traços das argamassas foram denominados de acordo com o percentual de substituição, como mostra o quadro 3.1.

³ Inicialmente esta pesquisa fixou os teores de substituição de cimento por RVL em 0, 5, 10, 15 e 20% (em massa) de acordo com a revisão bibliográfica. Porém devido a diferença encontrada entre a massa específica do RVL e a do cimento, foi necessário a realização de uma compensação de volumes, deste modo os teores de substituição foram recalculados e alterados para 0, 7, 13, 20 e 26%.

Quadro 3.1 - Nomenclaturas dos traços

Nomenclatura	Teores de substituição
ARE 0	Argamassa de recuperação estrutural referência
ARE 7	Argamassa de recuperação estrutural com 7% de substituição
ARE 13	Argamassa de recuperação estrutural com 13% de substituição
ARE 20	Argamassa de recuperação estrutural com 20% de substituição
ARE 26	Argamassa de recuperação estrutural com 26% de substituição

Fonte: Acervo Pessoal

As relações água/cimento e cimento/areia foram determinadas de acordo com a revisão bibliográfica e com a resistência à compressão mínima determinada, já que as argamassas desta pesquisa foram projetadas para alcançar o valor mínimo de 30 MPa, resistência à compressão média muito comum em concretos de estruturas convencionais no Brasil. Mattos (2002) baseado em estudos anteriores sobre materiais de reparo, utilizou relações água/cimento e cimento/areia iguais à 0,4 e 1:3, respectivamente. Serão estas as proporções utilizadas também neste estudo.

Os traços e dosagens das argamassas de acordo com o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro estão descritos na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Quantidade de materiais (em massa)

Traço	Cimento	RVL	Areia	Água/cimento ¹	Aditivo (%) ²
ARE 0	1,00	0,00	3,00	0,40	0,24
ARE 7	0,93	0,05	3,00	0,40	0,40
ARE 13	0,87	0,10	3,00	0,40	0,50
ARE 20	0,80	0,15	3,00	0,40	0,59
ARE 26	0,74	0,20	3,00	0,40	0,65

Nota ¹: A incorporação de aditivo a argamassa pode provocar uma variação na relação água/cimento, porém no caso desta pesquisa esta variação não foi significativa e por isso foi desconsiderada.

Nota ²: O percentual de aditivo foi calculado em relação a massa do cimento.

Fonte: Acervo Pessoal

A utilização do aditivo plastificante concentrado à base de resinas naturais e livre de cloretos foi necessária para garantir a trabalhabilidade das argamassas e atingir o índice de consistência pré-estabelecido. De acordo com o fabricante, este produto

deve ser usado com cimentos CP II ou V e o consumo aproximado é de 100 ml de aditivo para cada saco de cimento de 50 kg.

Como não existem normas brasileiras que determinam a metodologia de execução e avaliação das propriedades das argamassas de recuperação estrutural, optou-se por seguir a metodologia de ensaios utilizada por Mattos (2002), em seus estudos comparativos entre argamassas de recuperação industrializadas com argamassas de recuperação com sílica ativa produzidas em laboratório.

Dessa forma, as argamassas foram confeccionadas em misturador planetário (figura 3.11) de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7215 (ABNT, 1997).

Figura 3.11 – Misturador planetário utilizado nas confecção das argamassas.



Fonte: Acervo Pessoal

No estado fresco foram feitos os ensaios para determinação de consistência pelo espalhamento do tronco de cone na mesa (figura 3.12), realizados conforme NBR 13276 (ABNT, 2005), sendo estabelecido como fator constante o índice de consistência de 200 ± 10 mm, e para determinação de massa específica de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005).

Figura 3.12 – Determinação de consistência pelo espalhamento do tronco de cone na mesa.



Fonte: Acervo Pessoal

A moldagem e cura dos corpos de prova foram realizadas de acordo com a metodologia proposta pela norma de cada ensaio a ser realizado em estado endurecido.

3.4.2 Ensaio no estado endurecido

3.4.2.1 Resistência à compressão axial

Para os ensaios de resistência à compressão axial foram moldados 120 corpos de prova cilíndricos de 50x100mm, seguindo a metodologia descrita na NBR 7215 (ABNT, 1997). Após a moldagem, os corpos de prova foram mantidos na câmara úmida e desmoldados após 24 horas. Em seguida, os corpos de prova foram identificados e submetidos à cura imersa em água saturada com cal até a data pré-determinada para a realização de cada ensaio, como visto na figura 3.13.

Figura 3.13 – Corpos de prova submetidos à cura imersos em água saturada com cal.



Fonte: Acervo Pessoal

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados aos 7, 28, 63 e 270 dias em conformidade com a NBR 5739 (2007). Antes da realização dos ensaios, os corpos de prova foram retificados. Os rompimentos foram realizados na prensa *Amsler* de mostrador analógico, no LEMAC-UFES (figura 3.14).

Figura 3.14 – Ensaio para determinação da resistência à compressão axial



Fonte: Acervo Pessoal

3.4.2.2 Módulo de elasticidade dinâmico

A determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi feita aos 28, 63 e 270 dias, através de medidor de velocidade de propagação de onda ultrasônica, modelo *Pundit Lab* da Proceq, de acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2008), como visto na figura 3.15.

Figura 3.15 – Ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo Pessoal

Como este é um ensaio não-destrutivo, foram utilizados os mesmos corpos de prova dos ensaios de resistência à compressão axial, ou seja, 6 corpos de prova de cada traço para cada idade (90 corpos de prova). Na idade estabelecida, com os corpos de prova retificados, a medição da velocidade de propagação de onda ultrasônica era realizada e só após esta medição os corpos de prova eram rompidos para avaliação da resistência à compressão.

Com os dados de velocidade de propagação de onda ultrasônica das argamassas coletados, os valores de módulo de elasticidade foram calculados de acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2008) utilizando a seguinte equação:

$$E_d = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

E_d o módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

v é a velocidade de propagação de onda ultrasônica (mm/ μ s);

ρ é a densidade de massa aparente do corpo de prova (kg/m³);

μ é o coeficiente de Poisson. Que, de acordo com a NBR 15630 (ABNT, 2008), para este caso adota-se o valor 0,2.

3.4.2.3 Retração linear

O ensaio de retração linear das argamassas foi realizado em corpos de prova prismáticos de 25x25x285mm, como determinado pela NBR 15261 (ABNT, 2005). Foram moldados 6 corpos de prova para cada traço, totalizando 30 corpos de prova. As argamassas foram mantidas nos moldes envolvidos com plástico filme, para proteger contra evaporação, nas primeiras 48 horas após a moldagem, quando foram feitas a desforma e a leitura inicial. Após a desforma, os corpos de prova foram mantidos na câmara seca até a última medição. Estes procedimentos de moldagem e cura foram realizados conforme especificações da NBR 15261 (ABNT, 2005).

As medições de variação dimensional foram feitas aos 1, 7, 28 e 63 dias, após a leitura inicial, através de um aparelho comparador de comprimento com relógio de precisão de 0,001 mm, conforme sugerido pela norma e visto na figura 3.16.

Figura 3.16 – Aparelho usado para determinação da retração linear das argamassas



Fonte: Acervo Pessoal

3.4.2.4 Resistência de aderência à tração

A resistência de aderência à tração foi determinada apenas para as argamassas com 0, 13 e 26% de substituição do cimento por RVL. Este ensaio procedeu de acordo com a metodologia descrita na norma NBR 13528 (ABNT, 2010) ⁴.

Para realização do ensaio de resistência de aderência à tração foi necessária a execução de três substratos padrão, cujo traço e a moldagem seguiram a metodologia descrita na norma NBR 14081-2 (ABNT, 2012). Após 24 horas da moldagem estes substratos de concreto armado foram desformados e mantidos em ambiente de laboratório. As argamassas foram aplicadas nos substratos após 28 dias da execução destes, que continuaram a ser mantidos em ambiente de laboratório até a execução do arrancamento. O corte para delimitação dos corpos de prova e a colagem das pastilhas metálicas de 100x100mm com cola epóxi foram executados no 3º dia após a aplicação da argamassa no substrato, como visto na figura 3.17.

Figura 3.17 – Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas metálicas coladas aguardando a execução do ensaio de arrancamento.



Fonte: Acervo Pessoal

⁴ A adaptação de alguns procedimentos desta norma, como a geometria da pastilha e a idade de execução do ensaio, foram necessários para que os resultados fossem comparáveis com os resultados de Mattos (2002) e Penacho (2012). Estes procedimentos adaptados da norma NBR 13528 (ABNT, 2010) são aceitos na norma anterior, a NBR 13528 (ABNT, 1995).

Os ensaios de arrancamento para determinação da resistência de aderência à tração foram realizados aos 7 dias após a aplicação da argamassa no substrato, utilizando um aparelho de arrancamento microprocessado, com a velocidade constante de 250 N/s (figura 3.18).

Figura 3.18 – Equipamento utilizado na execução do ensaio de arrancamento.



Fonte: Acervo Pessoal

3.4.2.5 Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade foi verificada nas argamassas após 63 dias de idade, de acordo com a metodologia de ensaio descrita na NBR 9779 (ABNT, 1995). Para este ensaio foram moldados 30 corpos de prova (6 corpos de prova para cada traço) cilíndricos de 50x100mm, seguindo a mesma metodologia de moldagem e cura dos corpos de prova utilizados nos ensaios de resistência à compressão axial.

Antes de secá-los na estufa até a constância de massa foi realizada a primeira determinação de massa dos corpos de prova. Depois de secos, os corpos de prova foram novamente pesados e, em seguida, colocados em um recipiente imersos parcialmente em água, como pode ser visto na figura 3.19. Após a imersão, o monitoramento de massa foi realizado a 3, 6, 24, 48 e 72 horas, conforme estabelecido na norma. Após a última determinação de massa, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral para verificação da ascensão capilar (figura 3.20).

Figura 3.19 – Corpos de prova imersos numa lâmina de água durante o ensaio.



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 3.20 – Corpo de prova rompido para verificação da ascensão capilar.



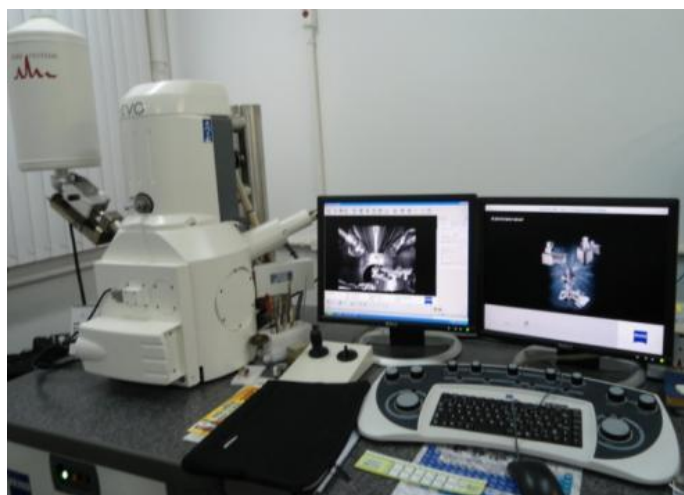
Fonte: Acervo Pessoal

3.4.3 Análise microestrutural

O estudo da microestrutura e da relação entre os constituintes de uma matriz cimentícia serve para auxiliar no controle das suas propriedades, sejam elas mecânicas ou de durabilidade (METHA; MONTEIRO, 2008).

Dessa forma, com o intuito de verificar se a substituição parcial do cimento pelo RVL provocou mudanças representativas na estrutura das argamassas e conseqüentemente nas suas propriedades, algumas amostras foram investigadas com o auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Zeiss, modelo EVO 40 XVP (figura 3.21).

Figura 3.21 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) utilizado nesta pesquisa.



Fonte: Acervo Pessoal

Tanto o processo de preparo das amostras para captação das imagens microestruturais, quanto a própria captação destas imagens foram realizadas no Laboratório de Caracterização de Superfícies dos Materiais do Programa de Pós - Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo. Devido à baixa condutividade do material analisado, foi necessário o aterramento dos fragmentos com fita metálica entre a superfície das amostras e o porta amostras, seguido pelo processo de metalização. Nesse processo de preparação as superfícies das amostras foram recobertas uniformemente com uma película de ouro e platina para que pudessem ser observadas ao MEV. Após a metalização das superfícies, e com as amostra já inseridas no MEV, as imagens foram obtidas utilizando o detector de elétrons secundários (SE).

As amostras analisadas no MEV foram coletadas aleatoriamente dos corpos de prova submetidos aos ensaios para determinação resistência à compressão axial após a idade de 28, 63 e 270 dias.

3.4.4 Análise estatística

Os resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido foram submetidos a testes estatísticos para verificar a variância, a fim de comparar a influência de cada um dos fatores controláveis (teor de substituição e idade) sobre as variáveis de resposta (propriedade avaliada).

Foi verificada a significância estatística, ao nível de confiança de 95%, do efeito das variáveis investigadas, por meio da análise de variância (ANOVA) com o auxílio do programa computacional *Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004). Essa é uma metodologia estatística que avalia não só a significância dos diversos fatores, mas também a interação entre eles (RIBEIRO e CATEN, 2010).

O efeito de um determinado fator controlável, ou da interação entre fatores, sobre a variável de resposta analisada é estabelecido pela comparação entre os valores calculados (F calculado) e os tabelados (F tabelado) de uma função de distribuição de probabilidade de Fischer. Os valores F tabelados são estabelecidos para um determinado nível de significância. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o F calculado for maior do que o F tabelado.

Essa significância também pode ser analisada através do p -valor. Ao adotar um nível de significância nas análises de 5% (p -valor = 0,05), estabelece-se que se o p -valor calculado for menor que o adotado, este determinado fator ou interação de fatores exerce influência significativa sobre a variável de resposta analisada.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

4. Resultados e Discussões

No capítulo anterior foram apresentados os métodos utilizados nos procedimentos experimentais desta pesquisa e demonstradas as características dos materiais utilizados no programa experimental.

Também foram estabelecidas as dosagens das argamassas e os percentuais de substituição do material cimentício por resíduo de vidro laminado - RVL (7, 13, 20 e 26%, além da argamassa referência) para o preparo dos corpos de prova que foram submetidos aos ensaios propostos. O método utilizado na análise estatística dos resultados também foi definido e descrito no capítulo 3.

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios descritos no programa experimental.

Inicialmente são avaliados os resultados dos ensaios realizados para caracterização do RVL. Em seguida são analisados os resultados dos ensaios nas argamassas no estado fresco, determinação do índice de consistência e massa específica, e no estado endurecido, resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, retração ou expansão linear, resistência de aderência à tração e absorção de água por capilaridade. Os resultados relativos aos ensaios no estado endurecido foram submetidos a uma análise estatística de variância – ANOVA.

Após a apresentação dos resultados dos ensaios nas argamassas no estado endurecido, são apresentados os resultados obtidos pela caracterização da microestrutura destas argamassas, a fim de obter associações entre estes resultados.

Os resultados individuais de cada corpo de prova encontram-se no apêndice A.

4.1 Caracterização do resíduo de vidro laminado – RVL

A amostra do RVL foi submetida a alguns ensaios a fim de caracterizá-la quanto a sua composição química, características físicas e mineralógicas, e índice de atividade pozolânica.

4.1.1 Caracterização química

A caracterização química foi realizada por ensaios de perda ao fogo e composição química, feita através da análise química semiquantitativa por fluorescência de raios-X (FRX). Os resultados destes ensaios estão descritos na tabela 4.1.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), os óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e CaO fazem parte do sistema ternário da composição química dos principais cimentos. Ao observar a composição química do RVL descrita na tabela 4.1, nota-se que estes óxidos somados chegam a aproximadamente 70% do total, o que indica o RVL como um material aceitável para fins cimentantes.

Tabela 4.1 - Composição química do RVL

Óxidos	Teores (%)
SiO ₂	56,77
CaO	5,64
MgO	3,67
Al ₂ O ₃	6,07
Fe ₂ O ₃	0,29
K ₂ O	0,16
SO ₃	0,16
Na ₂ O	15,41
Perda ao fogo	11,81

Fonte: Relatório técnico CTGAS-ER (2013)

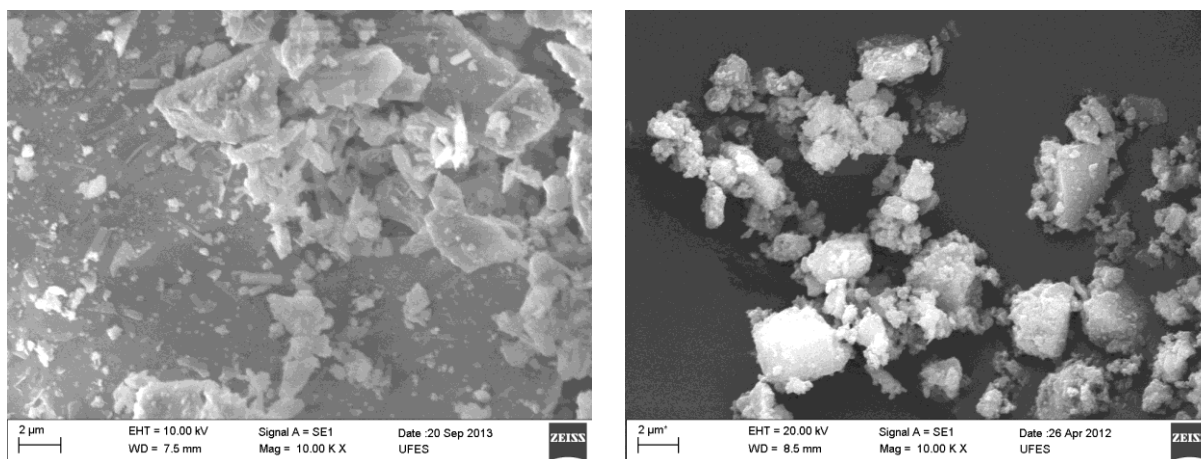
Porém, ao analisar os demais componentes do RVL, observa-se altos teores de Na₂O e MgO, em relação aos limites estabelecidos pela NBR 14656 (ABNT, 2001). Estes altos teores também foram observados na composição química dos resíduos de vidro estudados por Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012). Estes óxidos são responsáveis pela reação álcali-agregado, que causam expansões na matriz cimentícia. Além disso, o percentual de perda ao fogo também foi muito alto, aproximadamente três vezes o percentual encontrado para o cimento CP V ARI utilizado, o que pode ocasionar na diminuição da resistência da argamassa e consequentemente menor durabilidade. O alto percentual de perda ao fogo pode ser atribuído às impurezas de PVB, polímero orgânico, na amostra do RVL ensaiada.

4.1.2 Caracterização física e mineralógica

A caracterização física do RVL foi realizada através dos ensaios de determinação da composição granulométrica, massa específica e superfície específica. A caracterização mineralógica foi feita por difração de raios-X. Além disso, foram feitas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para análise da morfologia da partícula do RVL.

A determinação da composição granulométrica, massa específica e superfície específica foram apresentadas no capítulo 3. Nestes ensaios foram constatados que este resíduo possui massa específica igual à $2,31 \text{ g/cm}^3$ e superfície específica igual à $7833 \text{ cm}^2/\text{g}$, indicando que o RVL é mais fino que o cimento CP V ARI utilizado, que possui superfície específica igual à $4767 \text{ cm}^2/\text{g}$. Além disso, o ensaio de granulometria à laser indicou que 98% das partículas de RVL estão abaixo de $75 \mu\text{m}$, sendo que 90% são menores que $25 \mu\text{m}$. Para análise da morfologia da partícula do RVL foram feitas imagens por MEV, apresentadas na figura 4.1.

Figura 4.1 – Micrografias obtidas por MEV das partículas de cimento e de RVL



a) Cimento – ampliação 10000X

b) RVL – ampliação 10000X

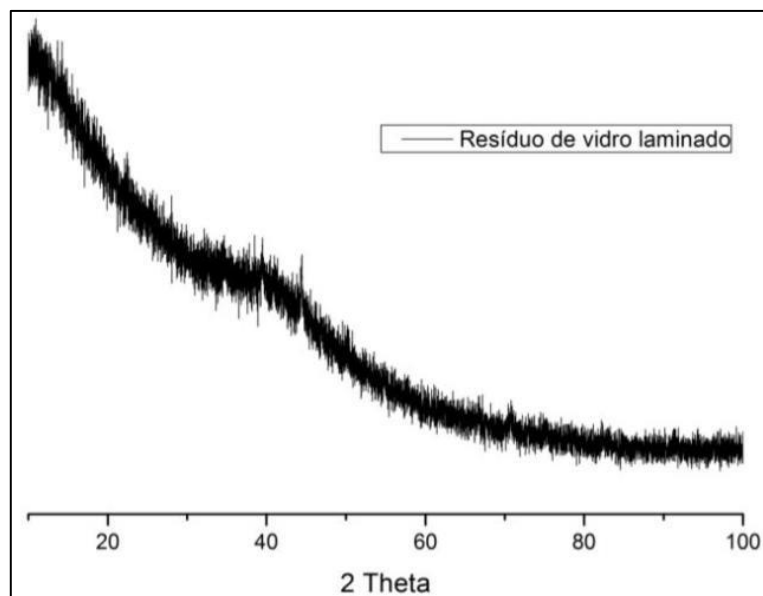
Fonte: Acervo Pessoal

Mesmo apresentando distribuição granulométrica semelhante a do cimento, o RVL apresentou superfície específica maior, o que pode ser atribuído a maior irregularidade da partícula de vidro em relação à partícula de cimento, como visto nas micrografias (figura 4.1). Estes resultados corroboram com os encontrados por Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010) e Matos e Souza-Coutinho (2012).

Por meio do difratograma de raios-X, mostrado na figura 4.2, foi possível observar que o RVL está predominantemente no estado amorfo, e por ter um alto teor de sílica este resíduo se apresenta como um material potencialmente pozolânico. De acordo com Shi *et al.* (2005), Ismail e al-Hashmi (2009), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010), Paiva *et al.* (2010), Araújo *et al.* (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos

(2012), quando o resíduo de vidro é utilizado em granulometria inferior a $75\mu\text{m}$, possui características pozolânicas devido a grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição.

Figura 4.2 - Difratoograma de raios-X do RVL



Fonte: Acervo Pessoal

4.1.3 Índice de atividade pozolânica

Os resultados encontrados na caracterização química e mineralógica, e a baixa granulometria em que o RVL foi utilizado, indicam que este é um material com alta atividade pozolânica.

Para esta constatação compararam-se as propriedades químicas do RVL com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para a classificação de um material pozolânico. Essa norma define como pozolana um material silicoso ou sílico-aluminoso finamente moído que sozinho possui pouco ou nenhum valor cimentício. Porém, à temperatura ambiente e na presença de umidade reage quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias, os silicatos estáveis.

De acordo com os resultados apresentados na tabela 4.2, o RVL pode ser classificado como material pozolânico classe E, se desconsiderados os resultados de perda ao fogo e conteúdo alcalino.

Tabela 4.2 - Comparação das propriedades químicas do RVL com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992)

Propriedades	Limites - NBR 12653 para diferentes classes de material pozolânico			RVL
	N	C	E	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ 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	3,67
Perda ao fogo, % máx	10,0	6,0	6,0	11,81
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx	1,5	1,5	1,5	15,41

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 1992)

Os diferentes resíduos de vidro estudados por Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) também apresentaram teores de álcalis (Na₂O) acima dos limites estabelecidos nas normas para materiais pozolânicos. Matos e Souza-Coutinho (2012) verificaram que apesar do alto conteúdo alcalino, a expansão devido à reação álcali-sílica (RAS) foi significativamente reduzida com a incorporação do resíduo de vidro nas argamassas. Isso ocorre, pois o consumo do álcali na formação do C-S-H durante a reação pozolânica antecede a RAS, não sobrando álcali suficiente para induzir essa reação deletéria.

Ainda de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 1992) o material deve estar predominantemente no estado amorfo, determinação atendida pelo RVL como demonstrado anteriormente pelo difratograma de raios-X na figura 4.2. Além dos parâmetros químicos e mineralógicos esta norma também define parâmetros físicos para confirmação da pozolanicidade de um material. A verificação das exigências físicas, compreendida pelo índice de atividade pozolânica, foi realizada através dos ensaios com cal e cimento determinados, respectivamente, pelas normas NBR 5751 (ABNT, 1992) e NBR 5752 (ABNT, 1992), ambos baseados na resistência à

compressão axial das argamassas. Os resultados foram comparados com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992) para materiais pozolânicos.

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

Para a realização do ensaio de índice de atividade pozolânica com cal foi utilizada Cal do tipo CH I conforme determinado pela norma NBR 5751 (ABNT, 1992), com massa específica igual a 2,23g/cm³. Os resultados encontrados neste ensaio são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados do ensaio de resistência à compressão axial para verificação do IAP-cal

Identificação do corpo de prova	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)
CP1-CAL	5,05		
CP2-CAL	4,46	4,77	5,77
CP3-CAL	4,81		

Fonte: Acervo Pessoal

De acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 1992), a resistência à compressão dos corpos de prova deve atingir, aos sete dias, um valor igual ou superior a 6,00 MPa, para que o resíduo seja considerado um material pozolânico com cal. Nota-se que nenhuma das amostras ensaiadas atingiu esse valor. Porém, foi verificado que os corpos de prova aos sete dias, mesmo seguindo os procedimentos de cura determinados pela NBR 5751 (ABNT, 1992), ainda encontravam-se úmidos (figura 4.3), o que pode ter colaborado para diminuição da resistência dos mesmos.

Figura 4.3 – Corpos de prova úmidos aos sete dias

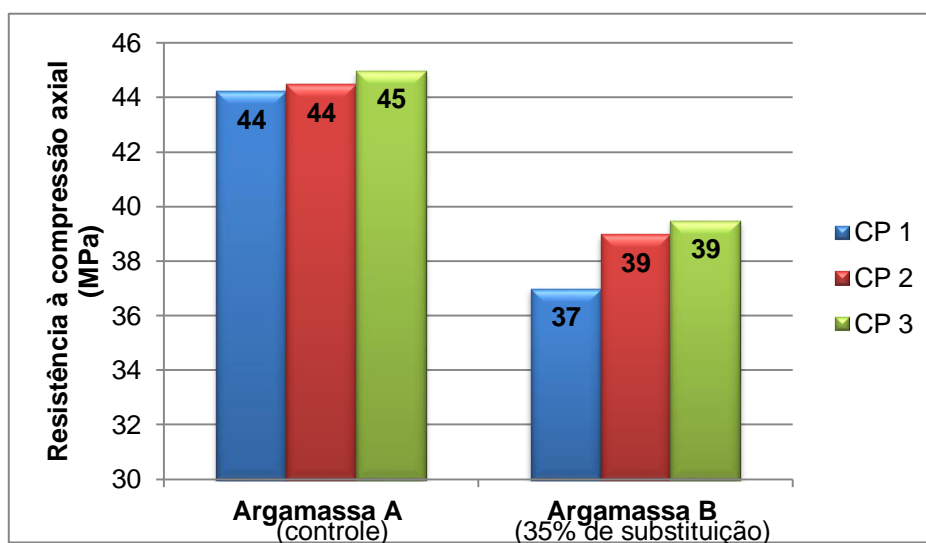


Fonte: Acervo Pessoal

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

Os resultados encontrados no ensaio de índice de atividade pozolânica com cimento, realizado de acordo com os procedimentos descritos pela NBR 5752 (ABNT, 1992) são mostrados na figura 4.4. Sendo a argamassa A correspondente as amostras da argamassa de controle e a argamassa B referente as amostras da argamassa com substituição de 35% em volume do cimento pelo RVL.

Figura 4.4 – Resultados individuais de resistência à compressão para verificação do IAP-cim



Fonte: Acervo Pessoal

Os resultados do ensaio para verificação do índice de atividade pozolânica com cimento das amostras ensaiadas encontram-se na tabela 4.4. O índice de atividade pozolânica com cimento é relação entre a resistência dos corpos de prova com substituição de 35% em volume do cimento (argamassa B) e a resistência dos corpos de prova de controle (argamassa A). Segundo a NBR 12653 (ABNT, 1992) para que o RVL seja considerado um material pozolânico, esta relação, ou seja, o índice de atividade pozolânica encontrado neste ensaio deve ser maior ou igual a 75,00%. Sendo o IAP-cim encontrado para o RVL igual a 86,36%, superior ao mínimo estabelecido pela norma, indicando a pozolanicidade deste resíduo.

Tabela 4.4 - Resultados do ensaio para verificação do IAP-cim

Amostra	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	IAP-cim (%)	Água requerida (%)
Argamassa A	44,57	0,93	-	100,00
Argamassa B	38,48	3,9	86,36	100,04

Fonte: Acervo Pessoal

Além disso, água requerida para preparação da argamassa B foi praticamente igual à quantidade necessária para a preparação da argamassa A, dessa forma a quantidade de água não foi responsável pela diferença das resistências médias das argamassas produzidas. Os resultados das propriedades físicas do RVL em comparação aos limites estabelecidos pela norma NBR 12653 (ABNT, 1992) estão resumidos na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Comparação das propriedades físicas do RVL com os limites estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 1992)

Propriedades	Limites - NBR 12653 para diferentes classes de material pozolânico			RVL
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 µm, % máx.	34	34	34	4,5
Índice de atividade pozolânica:				
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % min.	75	75	75	86,36
- com a cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0	4,77
- água requerida. % máx.	115	110	110	100,04

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 1992)

Também de acordo com as propriedades físicas, o RVL pode ser considerado um material pozolânico classe E, se desconsiderado o índice de atividade pozolânica com cal, o que pode ser considerado, pois o RVL será utilizado como substituto parcial do cimento.

Estes resultados estão de acordo com os valores descritos por Paiva *et al.* (2010), Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012), que encontraram em suas pesquisas com diferentes tipos de resíduos de vidro e granulometrias (sempre inferiores à 75µm),

índices de atividade pozolânica com cimento variando entre 85 e 104%, portanto, superiores ao mínimo determinado pela norma aos 28 dias, para materiais pozolânicos. Além disso, de acordo com Shi *et al.* (2005), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Pereira-de-Oliveira, Castro-Gomes e Santos (2012) quanto menor o tamanho da partícula do resíduo maior o índice de atividade pozolânica do material.

4.2 Ensaios realizados nas argamassas em estado fresco

É muito importante conhecer o comportamento da argamassa no estado plástico para que não haja prejuízo no desempenho do sistema, uma vez que várias propriedades da argamassa no estado endurecido serão afetadas pelas condições de aplicação deste material no estado fresco, podendo comprometer até a sua durabilidade. Dessa forma, as argamassas no estado fresco foram caracterizadas por meio das determinações do índice de consistência e massa específica.

4.2.1 Determinação do índice de consistência

Os resultados dos ensaios para determinação de consistência pelo espalhamento do tronco de cone na mesa, realizados conforme NBR 13276 (ABNT, 2005), estão expostos na tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Resultados das consistências determinadas de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2005) para as argamassas no estado fresco

Traço	Índice de consistência – parâmetro determinado (mm)	Índice de consistência obtido (mm)	Aditivo (%)
ARE 0		196,5	0,24
ARE 7		196,5	0,40
ARE 13	200 ± 10	202,5	0,50
ARE 20		209,5	0,59
ARE 26		206	0,65

Nota: O percentual de aditivo foi calculado em relação a massa do cimento.

Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se que quanto maior o teor de substituição do RVL por cimento maior a quantidade de aditivo plastificante utilizada para atingir o índice de consistência determinado, ou seja, menor a trabalhabilidade da argamassa. Segundo Dal Molin (2011) o consumo de água das matrizes cimentícias com adições minerais vai depender da forma e superfície específica de suas partículas. As adições de extrema finura, como é o caso da sílica ativa, tendem a aumentar o consumo de água com o aumento da porcentagem adicionada ou substituída.

Park e Lee (2004), Corinaldesi *et al.* (2005), Wang (2011) e Du e Tan (2013a) fizeram observações semelhantes relativas à consistência de argamassas com incorporação de resíduo de vidro, notando a redução da consistência na medida em que aumentava a quantidade de pó de vidro nas misturas. A queda do índice de consistência pode ser devido a granulometria fina (abaixo de 75 μm) do resíduo utilizado, pois um material de maior superfície específica tende a demandar maior consumo de água.

4.2.2 Determinação da massa específica

Os ensaios para determinação de massa específica das argamassas no estado fresco foram realizados de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005). Como o RVL apresenta massa específica menor que a do cimento, a incorporação deste resíduo nas argamassas influenciou na massa específica das misturas, já que os resultados mostraram que há uma tendência de queda no valor da massa específica com o aumento do teor de resíduo incorporado, como visto na tabela 4.7. Os resultados deste ensaio corroboram com os encontrados por Ismail e Al-Hashmi (2009), Nassar e Soroushian (2012), Penacho (2012) e Du e Tan (2013a) em suas pesquisas.

Tabela 4.7 - Resultados dos ensaios de massa específica no estado fresco

Traço	Massa específica obtida (g/cm^3)
ARE 0	2,061
ARE 7	2,065
ARE 13	2,178
ARE 20	2,049
ARE 26	2,052

Fonte: Acervo Pessoal

Segundo Carasek (2007), as argamassas podem ser classificadas como leve ($\gamma < 1,4 \text{g/cm}^3$), normal ($1,4 < \gamma < 2,3 \text{g/cm}^3$) ou pesada ($\gamma > 2,3 \text{g/cm}^3$), de acordo com a sua massa específica no estado fresco (γ). Dessa forma, as argamassas produzidas nesta pesquisa podem ser classificadas como normais.

4.3 Ensaios realizados nas argamassas em estado endurecido

No estado endurecido foram verificadas propriedades mecânicas consideradas básicas para garantir um bom desempenho ao longo da vida útil das argamassas de recuperação estrutural, através dos ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, retração linear e resistência de aderência à tração. Além da avaliação da permeabilidade, por meio do ensaio de absorção de água por capilaridade e das propriedades microestruturais por meio de MEV destas argamassas. Os resultados obtidos nesses ensaios, bem como as análises estatísticas realizadas, são apresentados e discutidos a seguir.

4.3.1 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial das argamassas foi determinada de acordo com a norma NBR 5739 (2007), aos 7, 28, 63 e 270 dias de idade, sendo os valores médios obtidos apresentados na tabela 4.8. Foram testados 6 corpos de prova para cada idade, os resultados individuais dos ensaios de resistência à compressão axial estão apresentados no Apêndice A.1.

A figura 4.5 representa os resultados médios de resistência à compressão axial das argamassas estudadas para melhor visualização. As argamassas com substituição de cimento por RVL, em geral, obtiveram resultados de resistência inferiores à argamassa referência. Entretanto, todos os valores são satisfatórios para um material de reparo atingindo resultados superiores a 30 MPa em idades mais avançadas, mostrando-se compatíveis aos concretos utilizados em estruturas convencionais, quanto a resistência à compressão. Estes resultados são

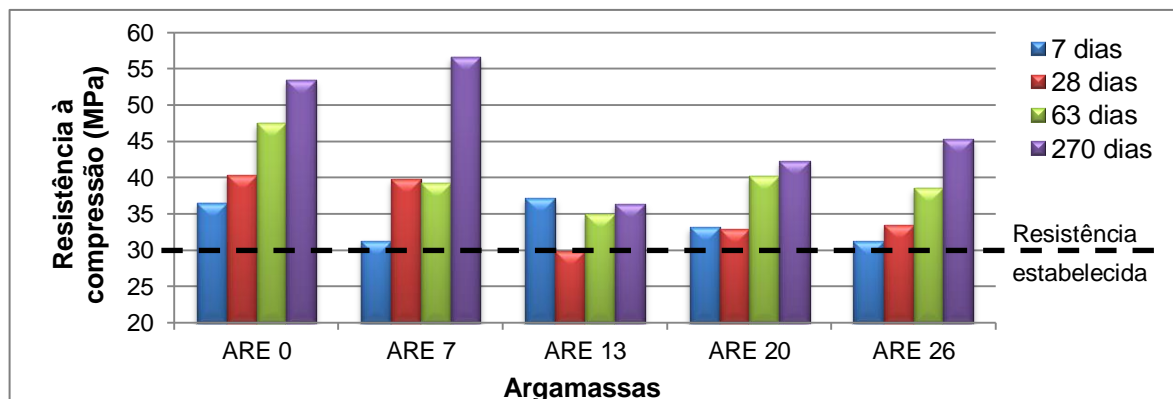
semelhantes aos encontrados por Antônio (2012) em seus estudos sobre a incorporação de resíduo de vidro em concretos.

Tabela 4.8 - Valores médios de resistência à compressão axial das argamassas

Traço	Idade (dias)	Resistência média à compressão (MPa)	Coefficiente de variação (%)
ARE 0	7	36,5	4,6
	28	40,4	4,9
	63	47,5	5,0
	270	53,5	4,3
ARE 7	7	31,3	4,4
	28	39,7	2,2
	63	39,2	2,3
	270	56,7	1,3
ARE 13	7	37,2	4,4
	28	29,8	5,5
	63	35,0	3,6
	270	36,4	3,0
ARE 20	7	33,2	2,3
	28	32,8	3,7
	63	40,2	2,2
	270	42,2	2,7
ARE 26	7	31,2	5,7
	28	33,5	5,9
	63	38,6	5,1
	270	45,3	2,2

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4.5 – Resistência à compressão axial



Fonte: Acervo Pessoal

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA), com o auxílio do programa computacional *Statistica 7.0* (STATSOFT, 2004). Os resultados da análise de variância podem ser visualizados na tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Análise de variância do efeito da idade e do teor de resíduo sobre a resistência à compressão axial.

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	p-valor	Resultado
Idade (dias)	3048,4	3	1016,1	405,0	2,69	0,0000	Significativo
RVL (%)	1669,5	4	417,4	166,3	2,46	0,0000	Significativo
Idade (dias) x Resíduo (%)	1314,7	12	109,6	43,7	1,85	0,0000	Significativo
Erro	273,5	109	2,5	---	---	---	---

Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

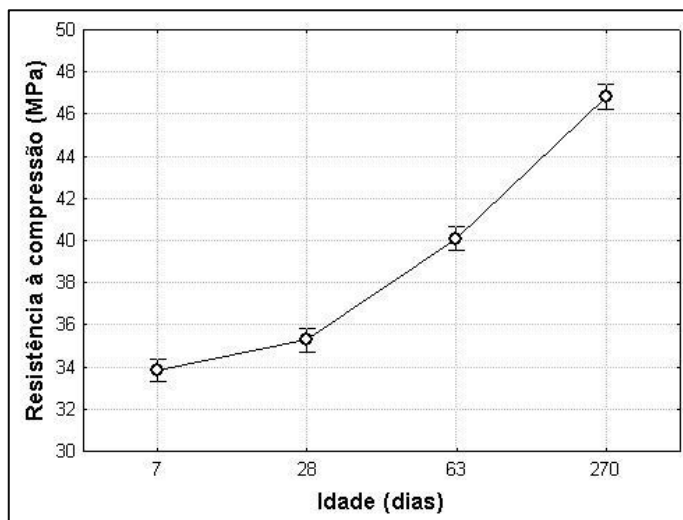
De acordo com a tabela 4.9, a idade, o teor de substituição de cimento por RVL e a interação entre essas duas variáveis são estatisticamente significativas, já que o valor de Fcal de cada variável é maior que o Ftab correspondente. Além disso, apresentam o p-valor menor que 0,05, ou seja, são estatisticamente significativas um nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exerce influência na resistência à compressão axial.

Observando-se os valores de Fcal e Ftab pode-se notar a intensidade de influência dos fatores. Desse modo, constata-se que a variável mais influente sobre os resultados de resistência à compressão axial foi a idade. Os gráficos de distribuição estatística da resistência à compressão axial em função das variáveis isoladas, idade e teor de substituição de cimento por RVL, estão expressas nas figuras 4.6 e 4.7. O efeito da interação destas variáveis sobre a resistência à compressão está expresso na figura 4.8.

É possível verificar na figura 4.6 a tendência de crescimento da resistência à compressão com o aumento da idade, ressaltando-se que o aumento de resistência nas idades mais avançadas, após os 28 dias, são maiores. Esse fato pode ser

devido a pozolanicidade do RVL, visto que as reações pozolânicas tendem a ocorrer em fases mais tardias, consequência do aumento da produção de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) nestas fases (SHI e ZHENG, 2007).

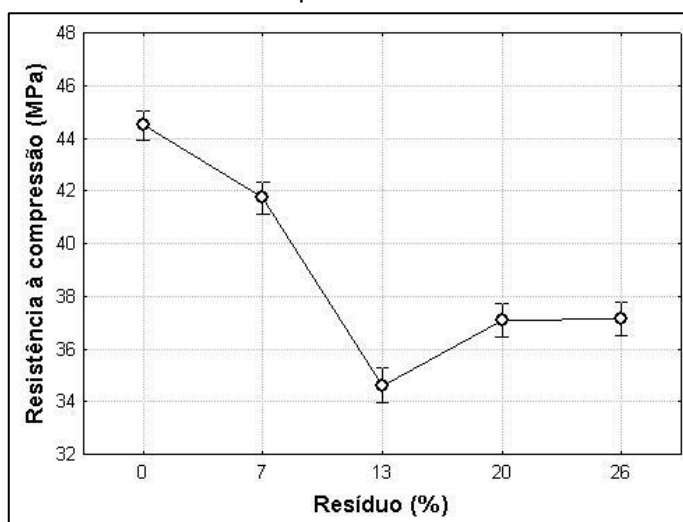
Figura 4.6 – Efeito isolado da idade sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Acervo Pessoal

A figura 4.7 mostra uma tendência de queda da resistência à compressão axial das argamassas com incorporação do RVL, sobretudo para ARE 13 (argamassa com 13% de substituição do cimento por RVL) que apresentou o menor valor de resistência à compressão.

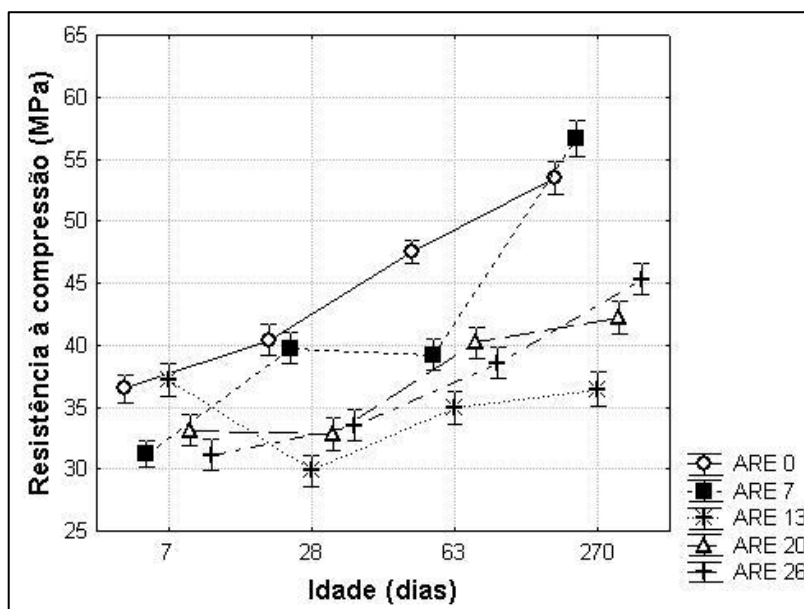
Figura 4.7 – Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre a resistência à compressão axial



Fonte: Acervo Pessoal

Com relação à interação entre idade e teor de resíduo observa-se pela figura 4.8 que até a idade de 63 dias nenhuma das argamassas com substituição atingiu valores superiores aos da argamassa referência. Essa queda na resistência pode ser explicada pela contaminação do resíduo por PVB. Aos 270 dias, apenas a ARE 7 atingiu valor de resistência à compressão axial superior (cerca de 6%) ao da ARE 0 (argamassa referência). Além disso, a ARE 26, mesmo tendo valores de resistência à compressão de cerca de 15% inferior aos valores da ARE 0, supera aos 270 dias os valores de resistência à compressão das argamassas ARE 13 e ARE 20, em 24 e 7%, respectivamente, atingindo um valor médio de resistência de 45,3 MPa.

Figura 4.8 – Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição de cimento por RVL sobre a resistência à compressão axial

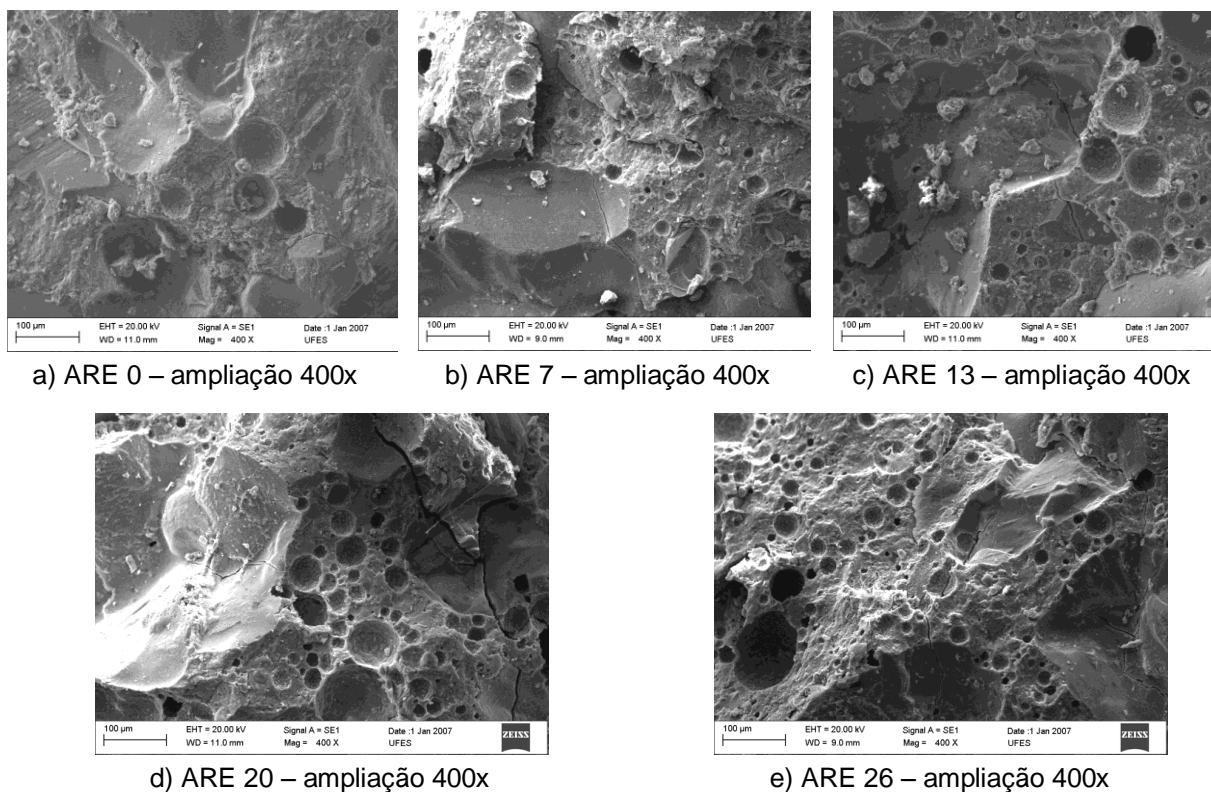


Fonte: Acervo Pessoal

Estes resultados corroboram com os encontrados por Wang (2011), Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) e Matos e Souza-Coutinho (2012) em suas pesquisas, em que as argamassas com incorporação de resíduo de vidro apresentaram valores inferiores aos da argamassa referência, porém ainda sim, satisfatórios. Sendo que as argamassas com maiores teores de substituição de resíduo de vidro, em geral, apresentaram melhores resultados nas idades mais avançadas. Estes autores também associam estes resultados ao potencial pozolânico dos resíduos estudados.

Ao analisar a microestrutura das argamassas na figura 4.9, nota-se que as argamassas com resíduo apresentam a estrutura interna com maior quantidade de poros e apesar do refinamento destes, a maior porosidade explica a tendência de queda da resistência das argamassas com incorporação de resíduo. Estes resultados diferem dos observados nos estudos de Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010), Wang (2011) e Matos e Souza-Coutinho (2012), que ao analisar imagens microestruturais obtidas por MEV das argamassas notaram a formação de uma estrutura mais densa nas argamassas com incorporação de resíduo de vidro

Figura 4.9 – Micrografias obtida com MEV das argamassas aos 270 dias



Fonte: Acervo Pessoal

4.3.2 Módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico é uma das mais importantes propriedades da argamassa de recuperação estrutural, pois define a capacidade do material se deformar diante de uma tensão aplicada dentro de um limite proporcional assumido. Sendo que este valor deve ser semelhante ao do substrato de concreto a ser

recuperado para garantir a vida útil do reparo (SILVA JUNIOR e HELENE, 2001; MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas foi determinado de acordo com a norma NBR 15630 (ABNT, 2008), aos 28, 63 e 270 dias de idade, sendo os valores médios obtidos apresentados na tabela 4.10 e figura 4.10 para melhor visualização. Assim como no ensaio de resistência à compressão axial, a argamassa ARE 7 foi a que apresentou os resultados mais próximos da argamassa referência (ARE 0).

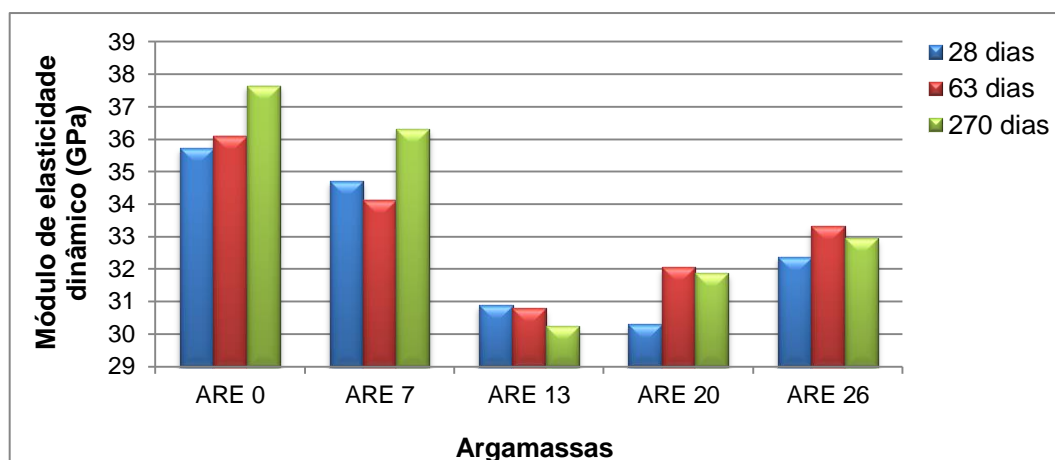
Como este é um ensaio não-destrutivo foram utilizados os mesmos corpos de prova do ensaio de resistência à compressão, ou seja, 6 corpos de prova para cada idade. Os resultados individuais dos destes ensaios estão apresentados no Apêndice A.2.

Tabela 4.10 - Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico das argamassas

Traço	Idade (dias)	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Coefficiente de variação (%)
ARE 0	28	35,7	2,0
	63	36,1	1,0
	270	37,7	2,3
ARE 7	28	34,7	3,0
	63	34,1	2,4
	270	36,3	9,2
ARE 13	28	30,9	1,0
	63	30,8	1,1
	270	30,3	2,2
ARE 20	28	30,3	0,5
	63	32,1	1,7
	270	31,9	2,1
ARE 26	28	32,4	4,9
	63	33,3	1,7
	270	33,0	1,9

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4.10 – Módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo Pessoal

Assim como nos resultados de resistência à compressão axial, a ANOVA indicou que tanto a idade quanto o teor de substituição de cimento por RVL foram variáveis que influenciaram significativamente os resultados obtidos de módulo de elasticidade dinâmico, além disso, a interação entre essas duas variáveis também foi considerada significativa. Estes resultados obtidos na análise de variância estão descritos na tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Análise de variância do efeito da idade e do teor de resíduo sobre o módulo de elasticidade dinâmico

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	p-valor	Resultado
Idade (dias)	15,3	2	7,7	6,1	3,13	0,0036	Significativo
Resíduo (%)	432,9	4	108,2	85,8	2,51	0,0000	Significativo
Idade (dias) x Resíduo (%)	28,0	8	3,5	2,8	2,08	0,0097	Significativo
Erro	94,6	75	1,3	---	---	---	---

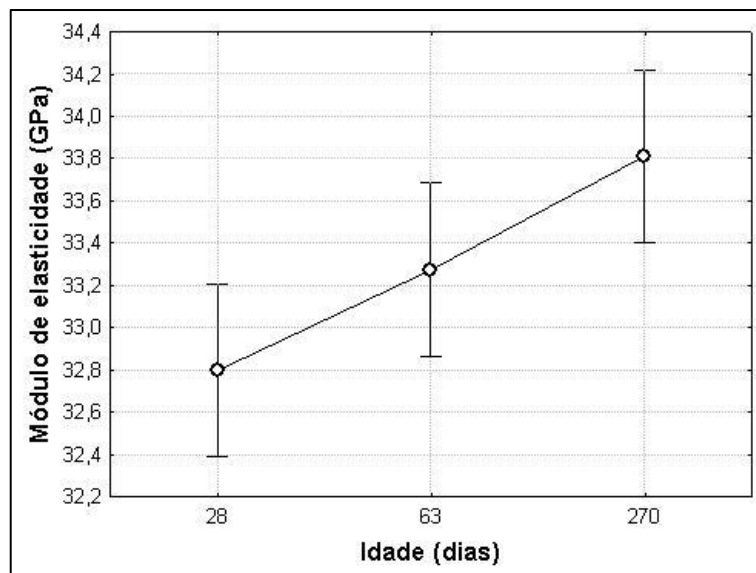
Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Tomando como base os valores de Fcal e Ftab, pode-se constatar que, diferentemente da propriedade anterior, o teor de substituição de cimento por RVL foi a variável mais influente sobre os resultados de módulo de elasticidade. Os gráficos de distribuição estatística do módulo de elasticidade dinâmico em função

das variáveis isoladas, idade e teor de substituição de cimento por RVL, e o efeito da interação destas variáveis estão expressas nas figuras 4.11, 4.12 e 4.13.

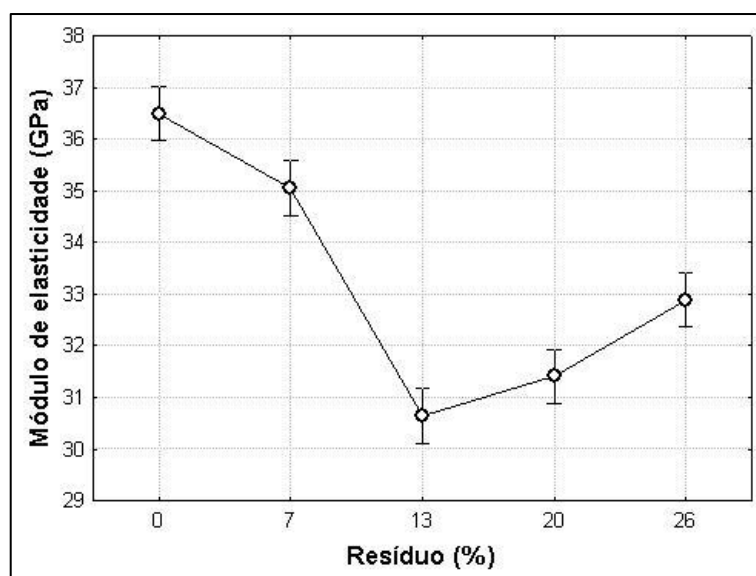
Figura 4.11 – Efeito isolado da idade sobre o módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo Pessoal

A figura 4.11 mostra a tendência de crescimento constante do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento da idade.

Figura 4.12 – Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre o módulo de elasticidade dinâmico



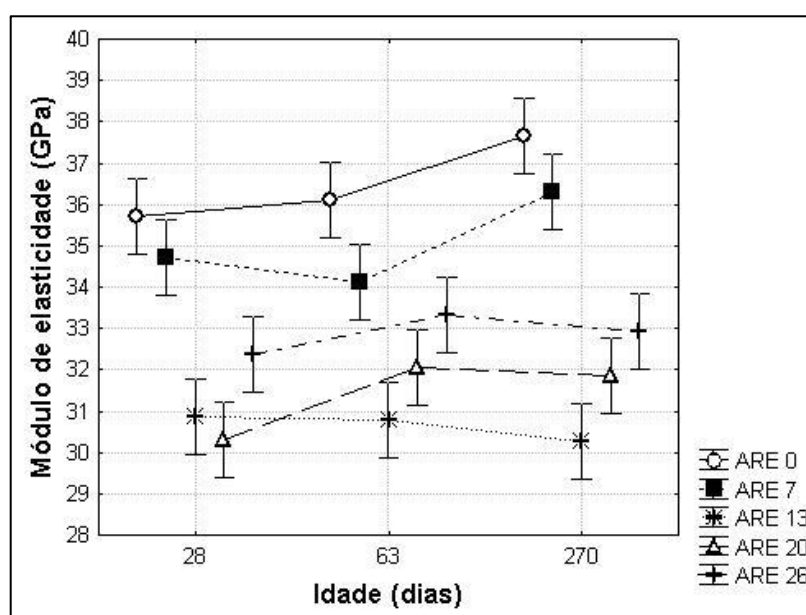
Fonte: Acervo Pessoal

Ao comparar as figuras 4.7 e 4.12 observa-se que o comportamento das argamassas de recuperação estrutural quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, se assemelha ao gráfico de resistência à compressão axial, ou seja, há uma tendência de queda do módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com incorporação do RVL.

Na figura 4.13 observa-se que em todas as idades, a argamassa referência apresentou valores de módulo de elasticidade dinâmico superiores aos das argamassas com substituição, resultado semelhante ao encontrado por Du e Tan (2013a).

Entre as argamassas com substituição do cimento pelo resíduo RVL, o módulo de elasticidade dinâmico variou de 30 à 36,5 GPa. As argamassas ARE 7 e ARE 26 apresentaram os resultados mais elevados dentro do grupo com o RVL, sendo respectivamente iguais a 95 e 92% dos resultados encontrados para ARE 0 aos 63 dias, e 96 e 88% dos resultados de ARE 0 aos 270 dias. Dentre as argamassas analisadas, ARE 13 apresentou os menores níveis de módulo de elasticidade dinâmico. Seus resultados foram de 86, 85 e 80% dos resultados encontrados para ARE 0 aos 28, 63 e 270 dias, respectivamente.

Figura 4.13 – Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição de cimento por RVL sobre o módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: Acervo Pessoal

Considerando que, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), o aumento da rigidez do concreto está diretamente ligado ao aumento do módulo de elasticidade e a diminuição da resiliência do material, ou seja, da capacidade deste material se deformar sem que ocorra a fissuração. Sendo assim, a argamassa com maior teor de substituição (ARE 26) foi a que apresentou os melhores resultados de módulo de elasticidade. Paiva *et al.* (2010) também atribuíram os melhores resultados as argamassas cimentícias com os maiores teores de incorporação de resíduo de vidro.

Quanto aos estudos relacionados a argamassas de recuperação estrutural com sílica ativa (MATTOS, 2002; AL-ZAHRANI *et al.*, 2003), com cinzas voltantes e pó calcário (FELEKOĞLU *et al.*, 2006) e com cinza de biomassa da cana-de-açúcar (BORJA *et al.*, 2012), os valores de módulo de elasticidade dinâmico encontrados foram compatíveis aos descritos nesta pesquisa. Além disso, considerando que o valor do módulo de elasticidade da argamassa deve ser igual ao do substrato de concreto a ser recuperado, os valores encontrados são satisfatórios, pois ao analisar os resultados obtidos por Antônio (2012) em concretos com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro, notou-se que os valores de módulo de elasticidade aos 28 dias são similares aos desta pesquisa.

4.3.3 Retração linear

Segundo Bastos (2001), a ocorrência de fenômenos patológicos nas construções pode estar diretamente relacionada à retração dos compósitos a base de cimento. A fissuração causada pela retração é um dos fenômenos que pode comprometer a durabilidade do sistema. Dessa forma, o estudo da retração se torna de extrema importância para argamassas de recuperação estrutural.

A retração linear das argamassas foi determinada de acordo com a norma NBR 15261 (ABNT, 2005), aos 1, 7, 28 e 63 dias de idade, sendo os valores médios obtidos apresentados na tabela 4.12. Foram ensaiados 6 corpos de prova prismáticos para cada idade, os resultados individuais dos ensaios de retração linear estão apresentados no Apêndice A.3.

Tabela 4.12 - Valores médios de retração linear das argamassas

Traço	Idade (dias)	Retração linear (mm/m)	Coefficiente de variação (%)
ARE 0	1	- 0,31	9,28
	7	- 0,66	7,09
	28	- 0,84	5,34
	63	- 0,93	6,07
ARE 7	1	- 0,33	8,23
	7	- 0,75	7,34
	28	- 0,90	6,20
	63	-0,99	6,30
ARE 13	1	- 0,35	11,64
	7	- 0,83	5,85
	28	- 0,96	4,95
	63	- 1,06	3,94
ARE 20	1	- 0,35	10,54
	7	- 0,84	3,93
	28	- 0,97	3,87
	63	- 1,07	3,86
ARE 26	1	- 0,31	13,24
	7	- 0,86	8,28
	28	- 0,99	9,42
	63	- 1,08	10,28

Fonte: Acervo Pessoal

Os valores encontrados nos ensaios de retração linear também foram submetidos a uma análise estatística de variância, cujos resultados estão na tabela 4.13. Do mesmo modo que nas análises anteriores, a ANOVA indicou que a idade, o teor de substituição de cimento por RVL e a interação entre essas duas variáveis influenciaram significativamente os resultados obtidos de retração linear.

Tabela 4.13 - Análise de variância do efeito da idade e do teor de resíduo sobre a retração linear

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	p-valor	Resultado
Idade (dias)	7,69	3	2,56	882,79	2,72	0,0000	Significativo
Resíduo (%)	0,28	4	0,07	24,07	2,49	0,0000	Significativo
Idade (dias) x Resíduo (%)	0,08	12	0,006	2,23	1,88	0,0165	Significativo
Erro	0,26	88	0,003	---	---	---	---

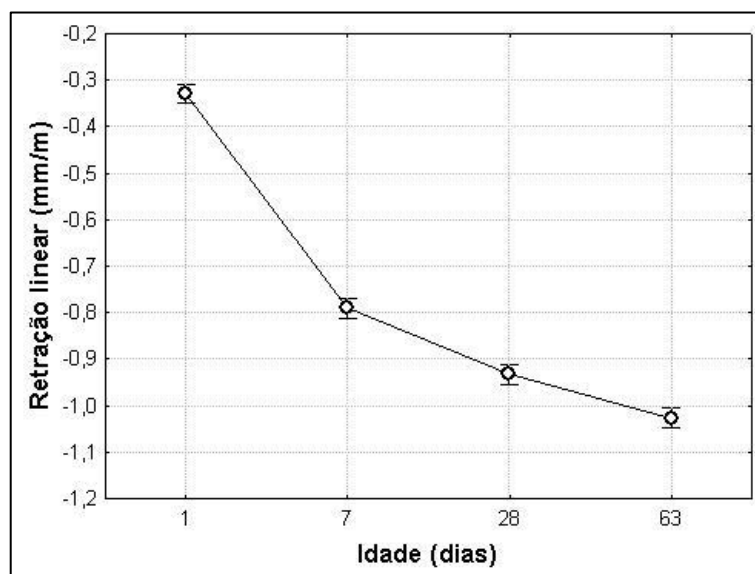
Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

Quanto à intensidade de influência dos fatores, a diferença entre o F_{cal} e F_{tab} mostra que a variável mais influente sobre os resultados de retração linear foi a idade. A distribuição estatística da retração linear em função das variáveis isoladas, idade e teor de substituição de cimento por RVL, e o efeito da interação destas variáveis sobre esta propriedade são mostrados através de gráficos nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

Na figura 4.14 nota-se que com o aumento da idade há uma tendência de maior retração linear das argamassas, ressaltando-se que durante os 7 primeiros dias as argamassas apresentam uma retração mais acentuada. A partir do 7º dia a retração tende a ser mais lenta e constante. Segundo Mehta e Monteiro (2008) a remoção da água adsorvida da pasta de cimento hidratada, em condições de baixa umidade relativa, é a principal causa da deformação da argamassa devido à retração por secagem. Primeiro ocorre por perda da água livre, dos poros maiores, seguindo da saída da água adsorvida nas paredes das camadas da estrutura do C-S-H, chamados vazios capilares, essa parte da retração é considerada irreversível.

Figura 4.14 – Efeito isolado da idade sobre a retração linear

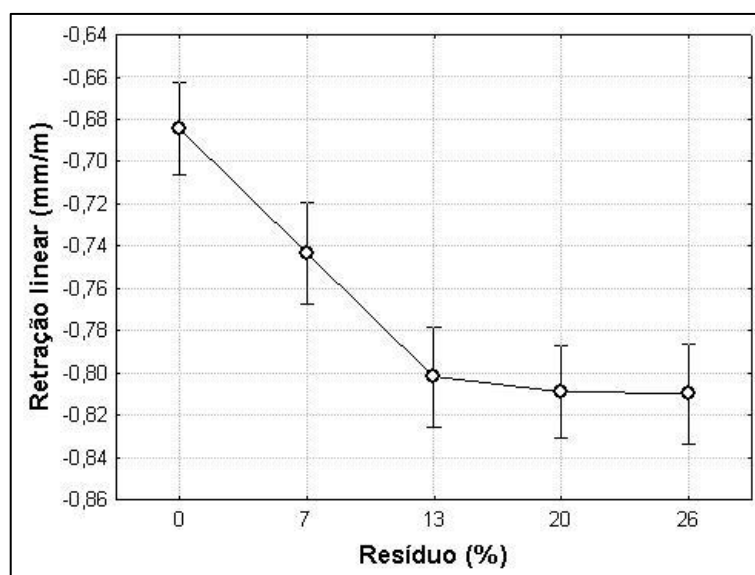


Fonte: Acervo Pessoal

A figura 4.15 mostra uma tendência de aumento da retração linear das argamassas com incorporação do RVL, sendo que as argamassas com teores de substituição

maiores que 13% tendem a ter retração semelhante. Para Mehta e Monteiro (2008) as adições minerais causam o refinamento dos poros, assim concretos e argamassas com adições normalmente apresentam maior retração por secagem.

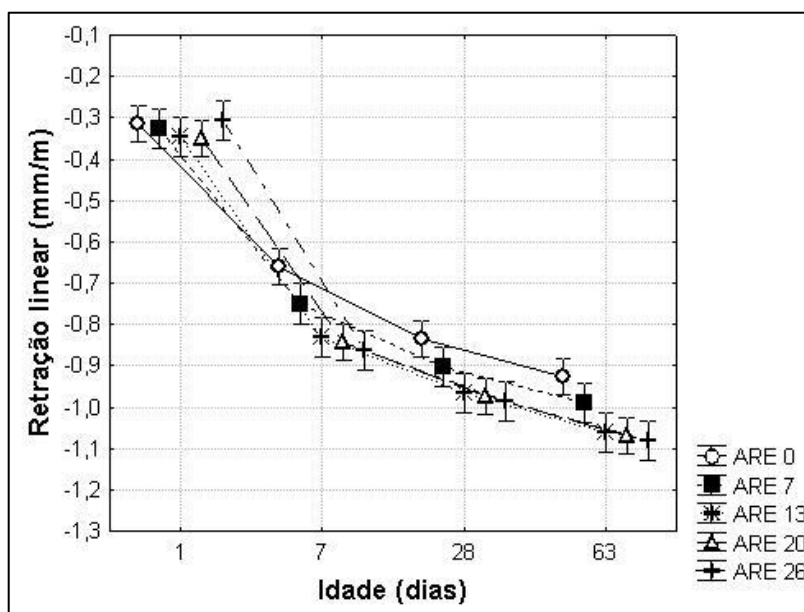
Figura 4.15 – Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre a retração linear



Fonte: Acervo Pessoal

A figura 4.16 mostra que durante as primeiras 24 horas, a argamassa referência apresentou valor de retração próximo aos valores encontrados para as argamassas com substituição do cimento por RVL. Durante os 6 dias seguintes nota-se a tendência do aumento da retração por secagem das argamassas com maiores teores de substituição. A partir do sétimo dia observa-se uma tendência de retração menos acentual e linear ao longo do tempo para todas as argamassas. Aos 63 dias os valores de retração para ARE 7, ARE 13, ARE 20 e ARE 26, foram respectivamente, 6%, 14%, 15% e 16% superiores ao valor de ARE 0. Estes valores estão em conformidade com os resultados encontrados para módulo de elasticidade dinâmico, pois de acordo com Penacho (2012), quanto menor o módulo de elasticidade maior a deformabilidade e, portanto, maior a tendência a retração da argamassa.

Figura 4.16 – Efeito da interação entre os fatores idade e teor de substituição de cimento por RVL sobre a retração linear



Fonte: Acervo Pessoal

A NBR 15261 (ABNT, 2005) indica que os corpos de prova devem ser mantidos em câmara seca com temperatura de $(23\pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(60\pm 5)\%$. Porém em medições durante a realização do ensaio foi constatado que a câmara seca utilizada nesta pesquisa não se encontrava nas condições descritas pela norma, apresentando temperatura média de 28°C e umidade relativa média de 78%. Por este motivo, as argamassas podem ter tido uma retração reduzida, já que de acordo com Bastos (2001) quando a umidade relativa diminui, a tensão superficial da pasta de cimento endurecida aumenta e a estrutura retrai-se, sendo que quanto menor a umidade relativa maior a retração por secagem.

4.3.4 Resistência de aderência à tração

A aderência é uma das propriedades consideradas básicas para que um material de recuperação tenha bom desempenho ao longo de sua vida útil, pois a transferência de esforços entre o substrato e a argamassa de recuperação depende da aderência entre estes materiais. Uma boa aderência garante a monoliticidade da estrutura e a maior durabilidade do reparo (SILVA JUNIOR e HELENE, 2001; MATTOS, 2002).

A resistência de aderência à tração das argamassas foi determinada de acordo com a norma NBR 13528 (ABNT, 2010), no 7º dia após a aplicação da argamassa no substrato padrão de concreto com idade de 28 dias, seguindo a metodologia adotada por Mattos (2002). Nesta etapa da pesquisa foram ensaiadas apenas as argamassas referência, com 13 e 26% de substituição de cimento por RVL (ARE 0, ARE 13 e ARE 26). Os resultados individuais obtidos no ensaio de arrancamento estão apresentados na tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de resistência de aderência à tração nas argamassas

Traço	CP's	1	2	3	4	5	6
ARE 0	Tensão de ruptura (MPa)	0,252	0,965	0,285	0,745	0,322	0,123
	Tipo de ruptura	a	b	a	b	a	a
	Média: 0,246 MPa	Desvio Padrão: 0,086		CV: 35,20 %			
ARE 13	Tensão de ruptura (MPa)	0,867	0,817	1,146	0,969	0,962	1,021
	Tipo de ruptura	c	a	d	a	c	a
	Média: 0,936 MPa	Desvio Padrão: 0,106		CV: 11,32 %			
ARE 26	Tensão de ruptura (MPa)	0,256	0,371	0,459	0,407	0,893	0,127
	Tipo de ruptura	a	a	a	a	a	a
	Média: 0,419 MPa	Desvio Padrão: 0,261		CV: 62,29 %			

Nota 1: As médias, desvios padrão e coeficientes de variação foram calculados apenas como os dados referentes aos corpos de prova com o mesmo tipo de ruptura (a), como indicado pela norma NBR 13528 (ABNT, 2010).

Nota 2: CV – coeficiente de variação.

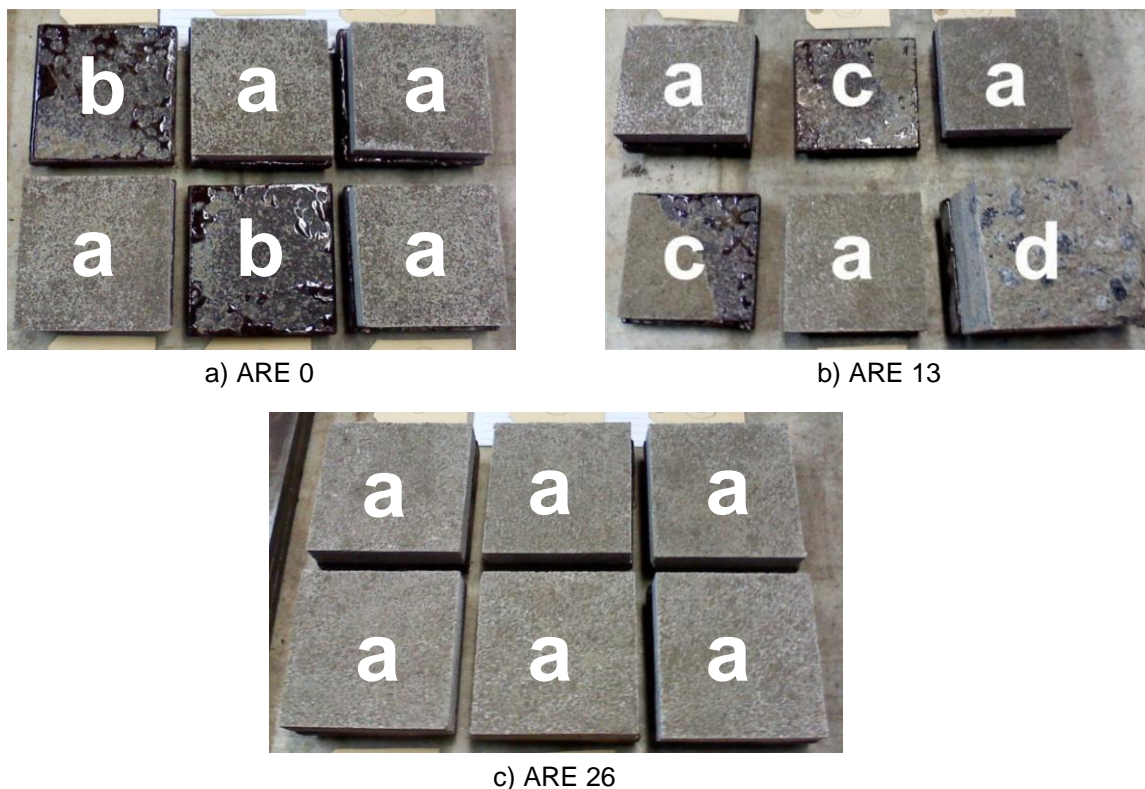
Nota 3: Tipos de ruptura: a – interface substrato X argamassa; b – interface cola X argamassa; c – interface cola X argamassa (dentro da argamassa); d – substrato.

Fonte: Acervo Pessoal

Após a execução dos ensaios de resistência de aderência à tração, notou-se uma grande variabilidade dos resultados, como observado na Tabela 4.14 e na figura 4.17. Este alto coeficiente de variação também foi observado nos resultados encontrados por Penacho (2012) e Mattos (2002) para ensaios semelhantes de resistência de aderência em argamassas com resíduo de vidro e sílica ativa, respectivamente. Este fato pode ser causado por diversos fatores, dentre eles a variação de absorção de água do substrato, interferindo na resistência superficial da argamassa, a variação da espessura da cola utilizada para fixar as pastilhas à

argamassa, ou ainda uma eventual diferença na aplicação desta cola (PENACHO, 2012).

Figura 4.17 – Corpos de prova após a execução do ensaio



Tipos de ruptura: a – interface substrato X argamassa; b – interface cola X argamassa; c – interface cola X argamassa (dentro da argamassa); d – substrato.

Fonte: Acervo Pessoal

A ANOVA indicou que o teor de substituição de cimento por RVL influenciou significativamente os resultados de resistência de aderência à tração. Estes resultados obtidos na análise de variância estão descritos na tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Análise de variância do efeito do teor de resíduo sobre a resistência de aderência

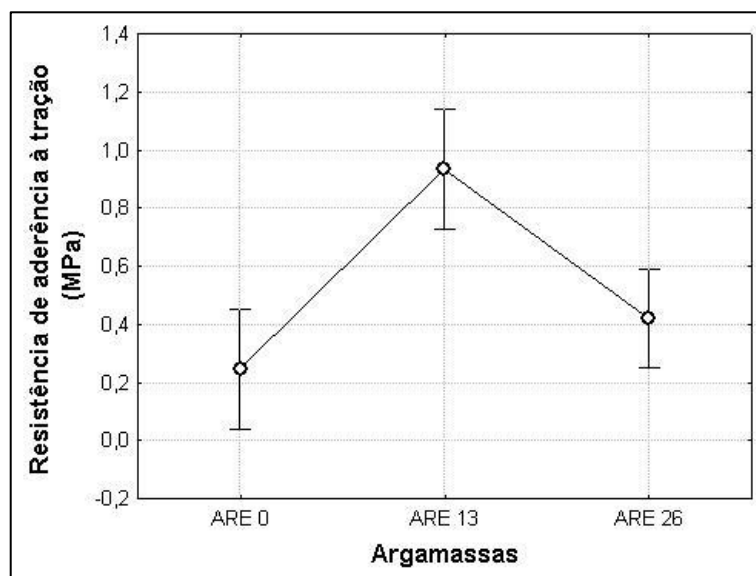
Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	p-valor	Resultado
Resíduo (%)	1,05	2	0,53	15,04	3,98	0,0007	Significativo
Erro	0,39	11	0,04	---	---	---	---

Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004)

O gráfico da distribuição estatística da resistência de aderência à tração em função do teor de substituição de cimento por RVL pode ser visto na figura 4.18. Nota-se que as argamassas com substituição do cimento por RVL apresentaram níveis de resistência de aderência à tração significativamente superiores ao valor encontrado para a argamassa referência, superando também o limite mínimo de 0,3 MPa estabelecido pela norma de resistência de aderência à tração de argamassas de revestimento. Lembrando que não há limites para argamassas de recuperação estrutural, já que não existem normas brasileiras que determinam o desempenho deste tipo de argamassa. Estes resultados são compatíveis aos encontrados por Mattos (2002), em seus estudos com argamassa de recuperação estrutural com sílica ativa.

Figura 4.18 – Efeito do teor de substituição de cimento por RVL sobre a resistência de aderência



Fonte: Acervo Pessoal

Segundo Carasek (2007), ao aplicar a argamassa no substrato, parte da água de amassamento da argamassa contendo em dissolução os componentes do aglomerante, penetra pelos poros do substrato. Com a hidratação do cimento, alguns produtos são formados, dentre eles a etringita, que depois de algum tempo exercem a função de ancoragem da argamassa ao substrato. Sendo a etringita, a principal responsável pelo intertravamento da argamassa endurecida ao substrato. Dessa forma, a estrutura das argamassas com incorporação de RVL pode estar

favorecendo esta ancoragem e por isso estas argamassas tendem a apresentar maior resistência de aderência à tração.

4.3.5 Absorção de água por capilaridade

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o tamanho e a continuidade dos poros capilares determinam a permeabilidade de uma matriz cimentícia. Essa propriedade está diretamente ligada à durabilidade das argamassas, pois a água, juntamente com íons agressivos, é responsável por alguns processos de deterioração da matriz.

Segundo Vaske, Campagnolo e Dal Molin (2008), a incorporação de adições minerais tendem a diminuir a permeabilidade das argamassas, melhorando as propriedades mecânicas e os aspectos relacionados a durabilidade.

A permeabilidade de uma argamassa pode ser determinada através do ensaio de absorção de água por capilaridade. Este ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 9779 (ABNT, 1995), com medições durante as primeiras 72 horas, sendo os valores médios obtidos para absorção na última medição, em 72 horas, apresentados na tabela 4.16. Foram ensaiados 6 corpos de prova para cada teor de substituição, os resultados individuais dos ensaios de absorção de água por capilaridade estão apresentados no Apêndice A.4.

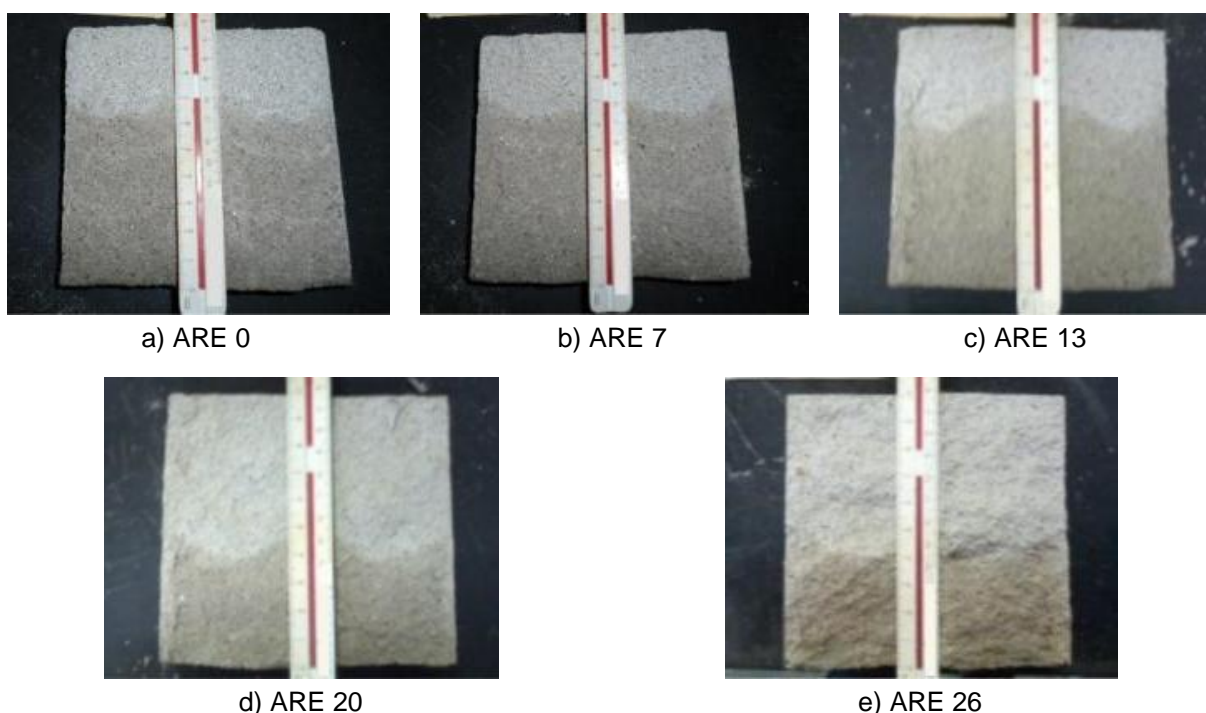
Tabela 4.16 - Valores médios de absorção de água por capilaridade das argamassas às 72 horas.

Traço	Absorção capilar às 72 h (g/m ²)	Coefficiente de variação (%)	Altura capilar às 72 h (mm)
ARE 0	1,09	11,63	80
ARE 7	1,11	14,1	75
ARE 13	1,24	17,4	86
ARE 20	0,73	4,23	45
ARE 26	0,84	9,78	48

Fonte: Acervo Pessoal

Após as 72 horas todos os corpos de prova foram rompidos para verificação da ascensão capilar, como pode ser visto na figura 4.19.

Figura 4.19 – Ascensão capilar nos corpos de prova após 72 horas



Fonte: Acervo Pessoal

Assim como nos ensaios anteriores, os resultados obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade foram submetidos a uma análise de variância. A ANOVA indicou que o tempo, o teor de substituição de cimento por RVL e a interação entre essas duas variáveis influenciaram significativamente os resultados obtidos de absorção de água por capilaridade. Sendo que a variável mais influente sobre estes resultados foi o tempo. Os resultados obtidos na análise de variância estão descritos na tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Análise de variância do efeito do tempo em horas e do teor de resíduo sobre a absorção de água por capilaridade

Fonte de variação	SQ	GL	MQ	Fcal	Ftab	p-valor	Resultado
Tempo (horas)	12,45	4	3,11	259,90	2,44	0,0000	Significativo
Resíduo (%)	2,06	4	0,52	43,02	2,44	0,0000	Significativo
Tempo (horas) x Resíduo (%)	0,46	16	0,03	2,40	1,71	0,0037	Significativo
Erro	1,50	125	0,01	---	---	---	---

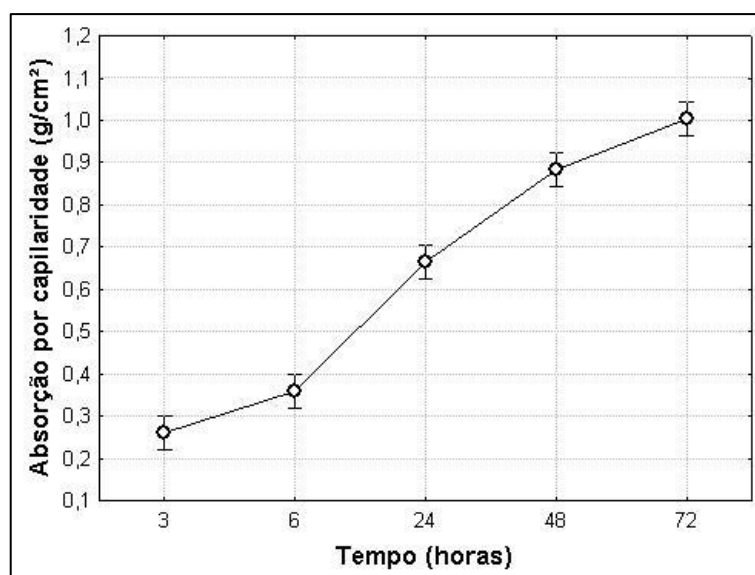
Notas: SQ - Soma dos quadrados; GL – Grau de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.

Fonte: Statística 7.0 (STATSOFT, 2004)

A distribuição estatística da absorção de água por capilaridade em função das variáveis isoladas, idade e teor de substituição de cimento por RVL, e o efeito da interação destas variáveis sobre esta propriedade são mostrados através de gráficos nas figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

A figura 4.20 mostra que durante as primeiras 24 horas é quando ocorre a absorção com maior intensidade, sendo que após as primeiras 24 horas, a velocidade de absorção das argamassas diminui gradativamente.

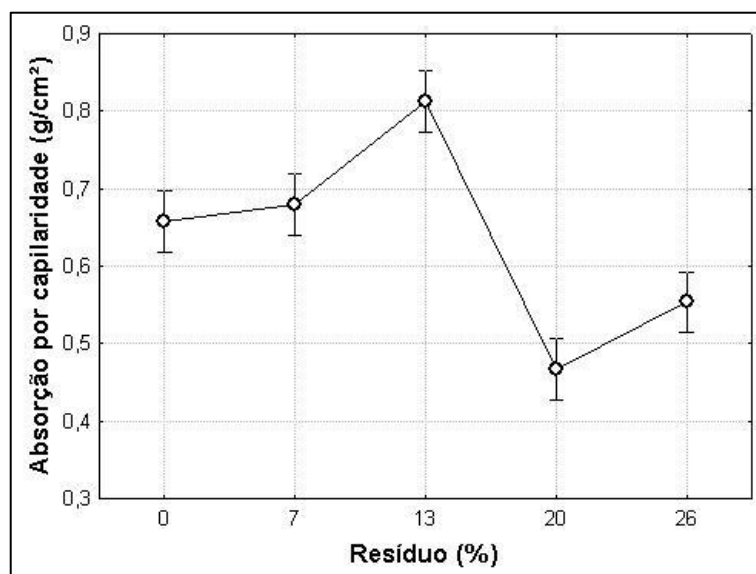
Figura 4.20 – Efeito isolado do tempo, em horas, sobre a absorção de água por capilaridade



Fonte: Acervo Pessoal

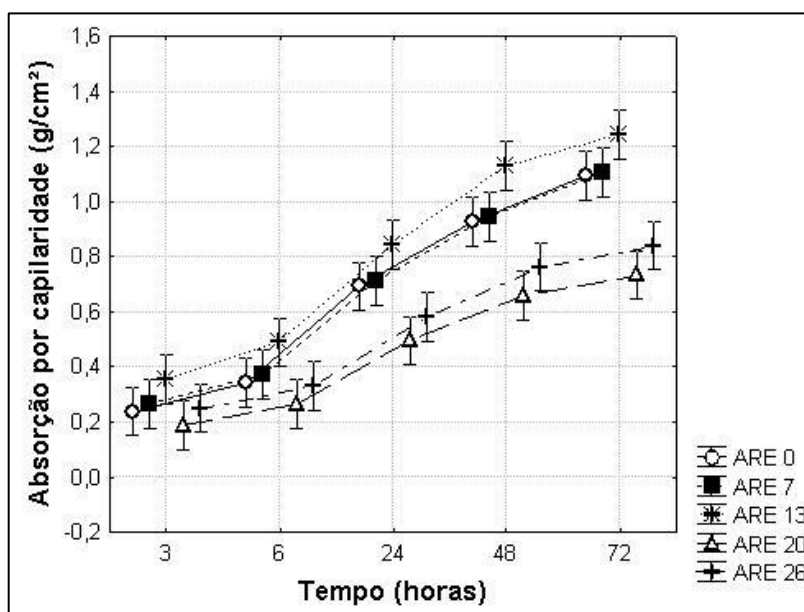
Nota-se na figura 4.21 que a absorção de água por capilaridade da ARE 7 é similar da argamassa referência (ARE 0). A argamassa ARE 13 é a que apresenta maior permeabilidade, já as argamassas com maiores teores de substituição (ARE 20 e ARE 26) apresentam-se menos permeáveis que todas as outras, inclusive que a argamassa referência. Este resultado de absorção de água por capilaridade ajuda a explicar a queda na resistência à compressão da ARE 13.

Figura 4.21 – Efeito isolado do teor de substituição de cimento por RVL sobre a absorção de água por capilaridade



Fonte: Acervo Pessoal

Figura 4.22 – Efeito da interação entre os fatores tempo e teor de substituição de cimento por RVL sobre a absorção de água por capilaridade



Fonte: Acervo Pessoal

Observa-se na figura 4.22 que, durante as 72 horas de ensaio, todas as medições realizadas indicaram que a ARE 0 e a ARE 7 tendem a ter estrutura de ligação entre poros semelhantes. As argamassas ARE 20 e ARE 26 foram as que obtiveram melhores resultados, demonstrando menores valores de absorção de água por

capilaridade, ao longo de todo o ensaio. Aos 72 dias, as argamassas com maiores teores de substituição, ARE 20 e ARE 26, apresentaram, respectivamente, resultados iguais a 67 e 77% do valor de absorção de água encontrado para ARE 0. Salomão *et al.* (2010), Ling e Poon (2012), Penacho (2012) e Du e Tan (2013a) também observaram a redução da absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de resíduo de vidro incorporado as argamassas.

Segundo Dal Molin (2011) as adições minerais tendem a reagir com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, gerando silicatos e sílico-aluminatos de cálcio hidratado, que ocupam tanto os vazios maiores quanto os canais capilares da pasta endurecida, reduzindo a permeabilidade e absorção da matriz cimentícia.

4.4 Análise microestrutural das argamassas

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as relações microestrutura-propriedades das argamassas devem ser estudadas a fim de auxiliar no entendimento das propriedades mecânicas e de durabilidade, já que as alterações encontradas na avaliação destas propriedades podem ter origem na microestrutura do material.

As principais fases sólidas na pasta de cimento hidratada que podem ser analisadas em um microscópio eletrônico de varredura são:

- O silicato de cálcio hidratado, C-S-H;
- o hidróxido de cálcio ou portlandita, Ca(OH)_2 ;
- a etringita; e
- o monossulfato hidratado.

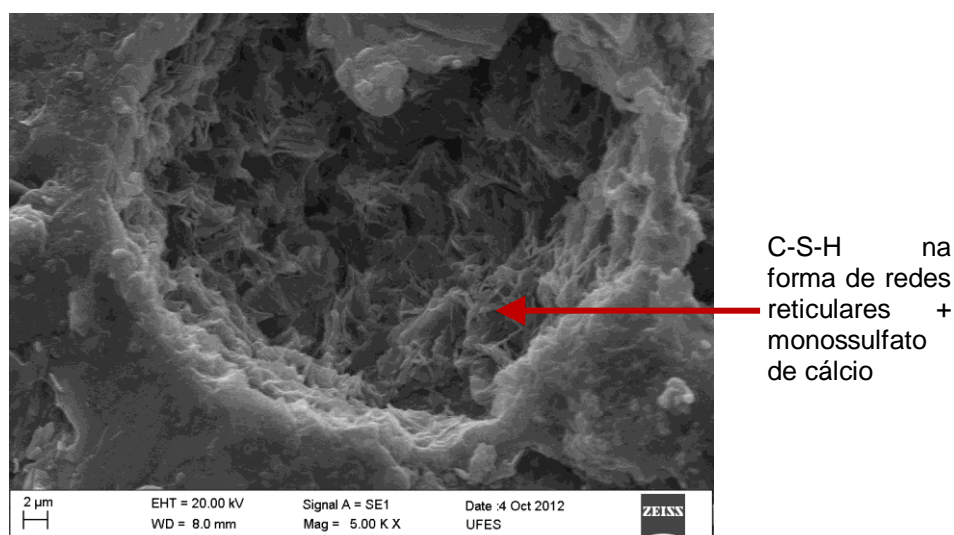
Ainda de acordo com Mehta e Monteiro (2008), a etringita e o hidróxido de cálcio são as primeiras fases sólidas a ser formar. Estes cristais tendem a evoluir para o C-S-H através das reações de hidratação. Este composto tende a ocupar os vazios antes ocupados por água e partículas de cimento em dissolução.

Porém, as adições minerais podem produzir alterações na quantidade e na ordem de formação destas fases sólidas, reagindo com o hidróxido de cálcio produzindo silicato de cálcio hidratado adicional (DAL MOLIN, 2011).

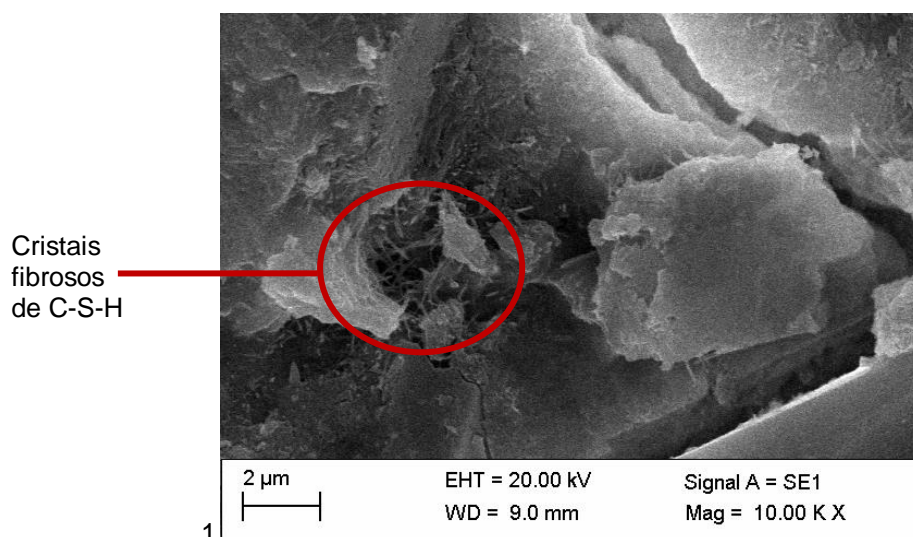
Dessa forma, foram feitas imagens microestruturais através do microscópio eletrônico de varredura a fim de analisar a formação das fases descritas acima, bem como a influência da incorporação de RVL nas reações de formação destes compostos e nas propriedades analisadas anteriormente. Foram feitas imagens através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) para todos os traços das argamassas nas idades de 28, 63 e 270 dias, das amostras após o rompimento para determinação da resistência à compressão axial.

A figura 4.23 mostra imagens obtidas por MEV da argamassa referência (ARE 0). Aos 28 dias, foi observada a formação de C-S-H associado a cristais de monossulfato hidratado nos poros da argamassa, o que indica uma pasta de cimento Portland bem hidratada. Na idade de 63 dias, ainda é possível observar a formação de cristais fibrosos de C-S-H preenchendo os espaços entre as partículas de cimento hidratado, o que pode explicar os bons resultados de resistência à compressão dessa argamassa. Além disso, nota-se que aos 270 dias a argamassa apresenta uma estrutura densa e com poucos poros.

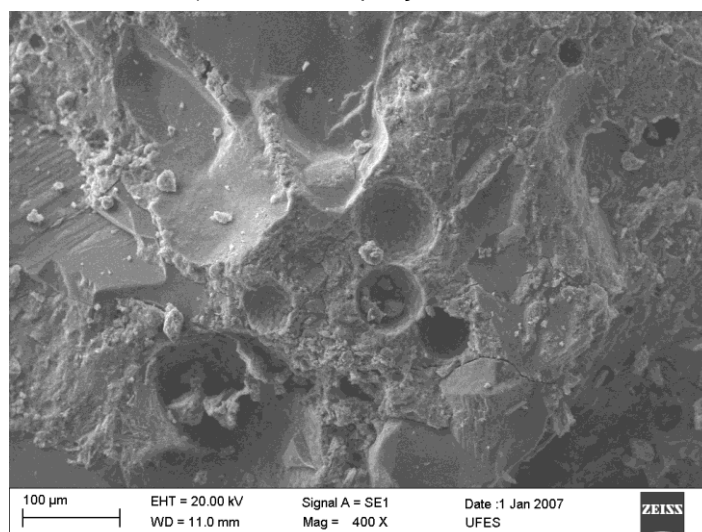
Figura 4.23 – Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 0 (argamassa referência) em diferentes idades.



a) 28 dias - ampliação 5000x



b) 63 dias - ampliação 10000x

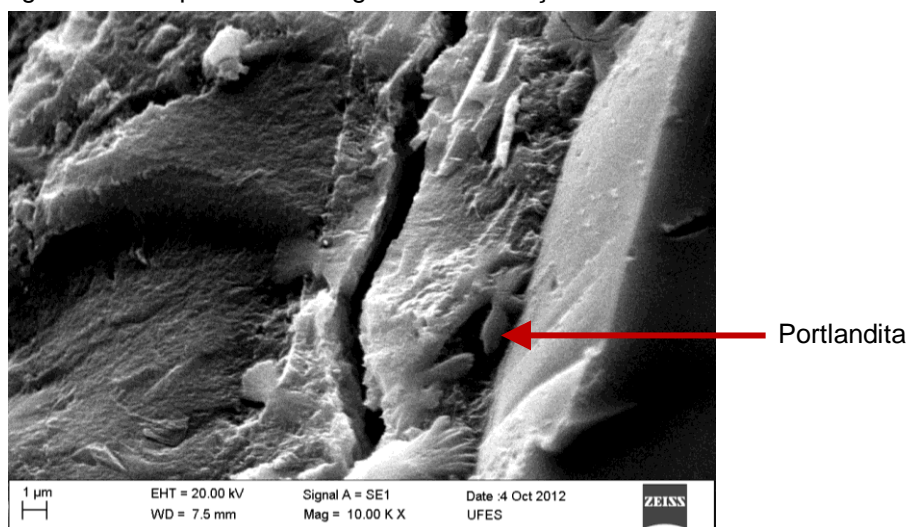


c) 270 dias - ampliação 400x

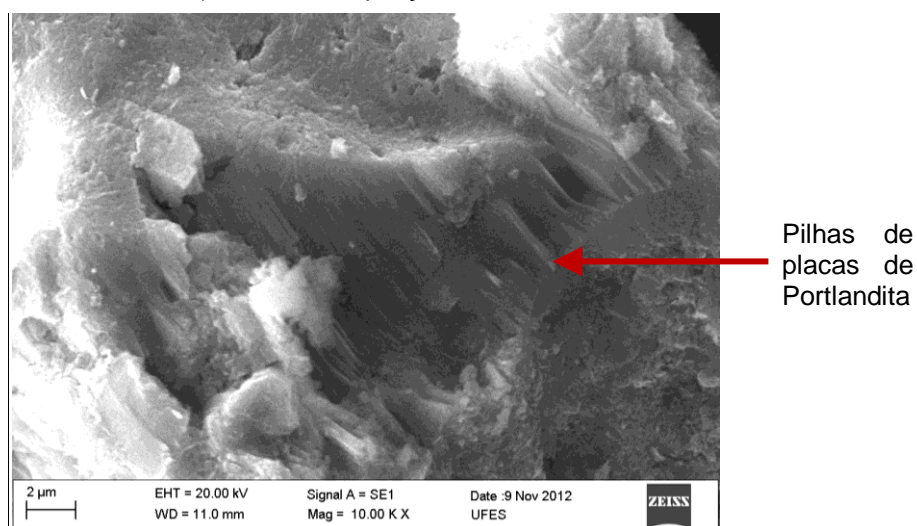
Fonte: Acervo Pessoal

As imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 7 estão demonstradas na figura 4.24. Aos 28 dias nota-se, claramente, a formação cristalina de hidróxido de cálcio (portlandita) ocupando o interior de um poro, já aos 63 dias, nota-se a formação de pilhas de placas de portlandita. Esta formação reduz a porosidade total, aumentando a densidade e, conseqüentemente, a resistência da argamassa. Aos 270 dias, foram observados alguns cristais fibrosos de C-S-H preenchendo os vazios da estrutura. A estrutura interna desta argamassa apresenta-se similar a estrutura da argamassa referência quanto à quantidade de poros.

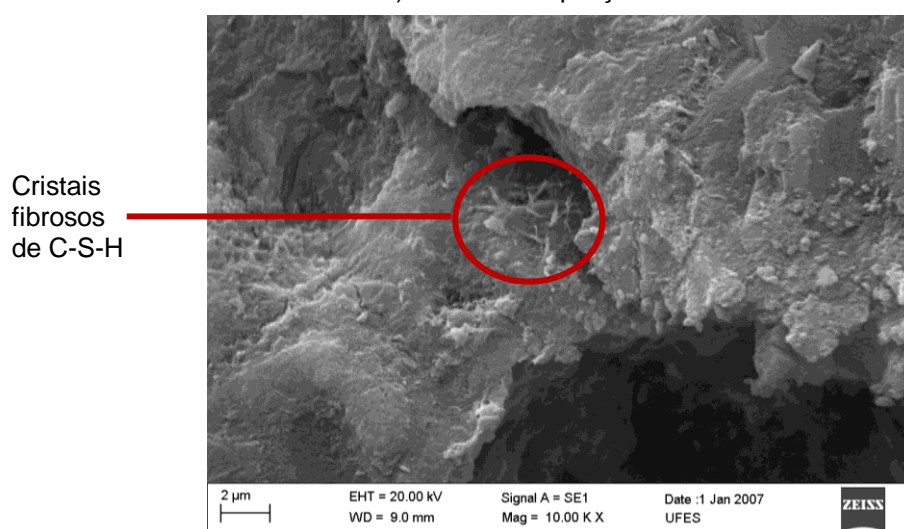
Figura 4.24 – Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 7 em diferentes idades.



a) 28 dias - ampliação 10000x



b) 63 dias - ampliação 10000x

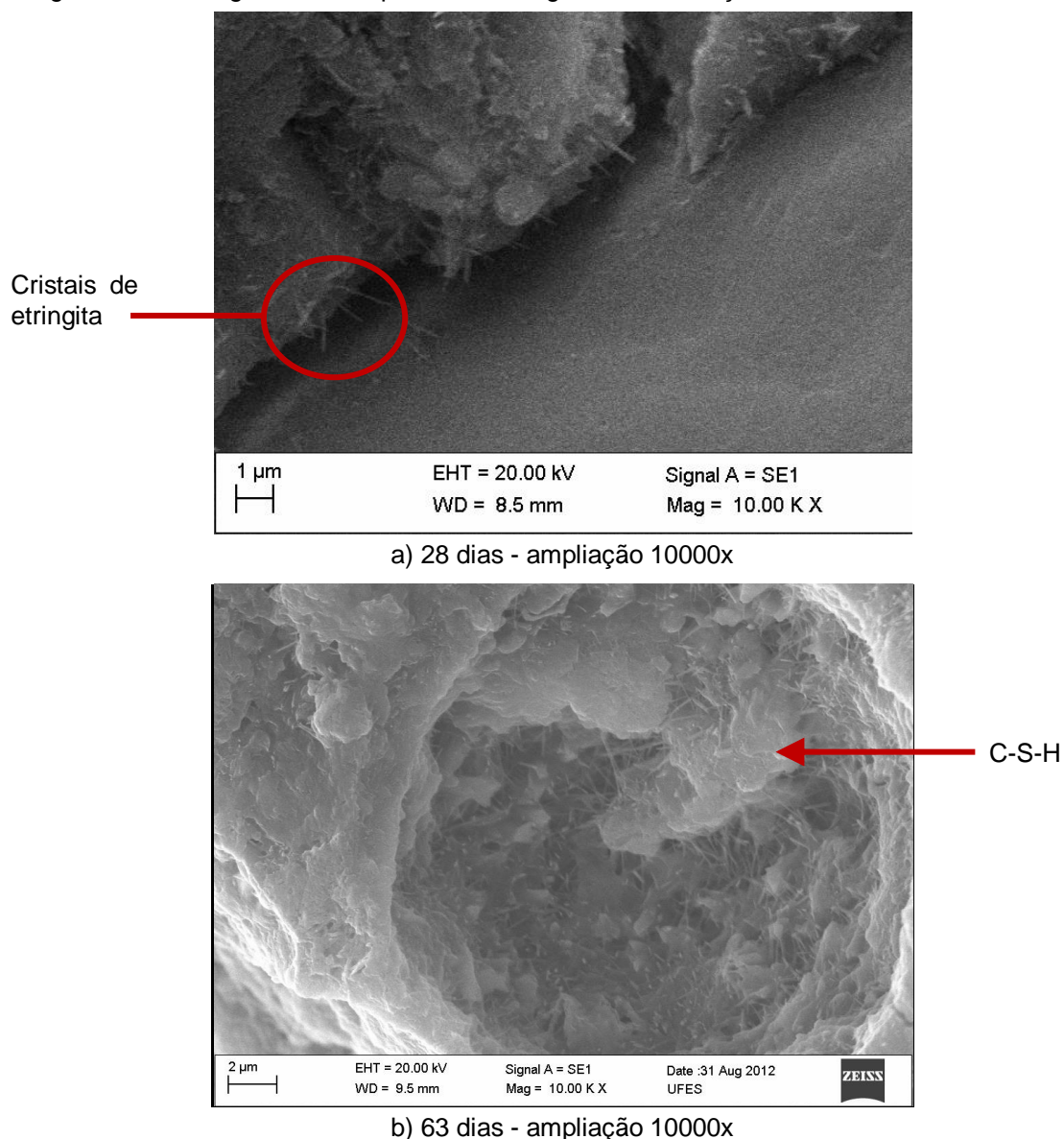


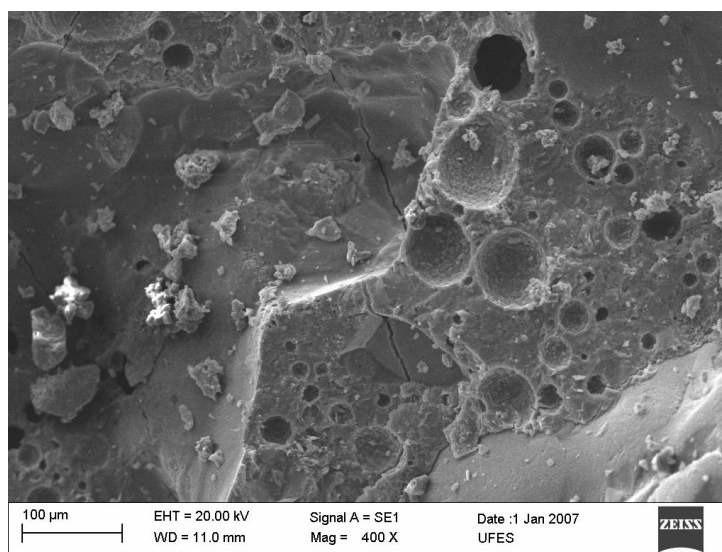
c) 270 dias - ampliação 10000x

Fonte: Acervo Pessoal

A figura 4.25 mostra as imagens da microestrutura da argamassa de traço ARE 13. Alguns cristais de etringita foram observados na interface entre a pasta e o agregado miúdo da argamassa aos 28 dias, esta zona de transição demonstra-se instável, estes fatos associados podem ter ocasionado a queda da resistência desta argamassa, uma vez que nesta idade a etringita já deveria ter evoluído para C-S-H. A formação destes compostos, aglomerações de C-S-H preenchendo os poros, só é observado aos 63 dias. Aos 270 dias esta argamassa apresenta uma estrutura porosa, o que corrobora com os resultados de absorção de água e de resistência à compressão da argamassa de traço ARE 13.

Figura 4.25 – Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 13 em diferentes idades.



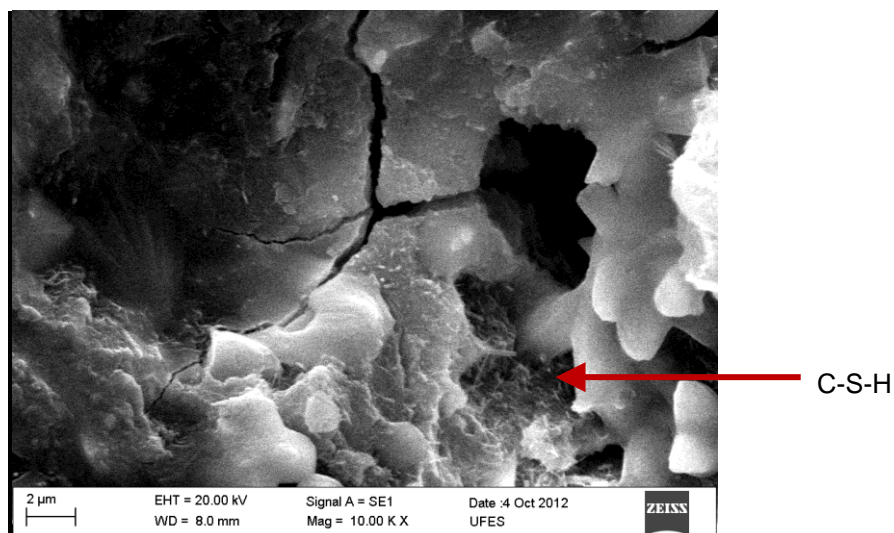


c) 270 dias - ampliação 400x

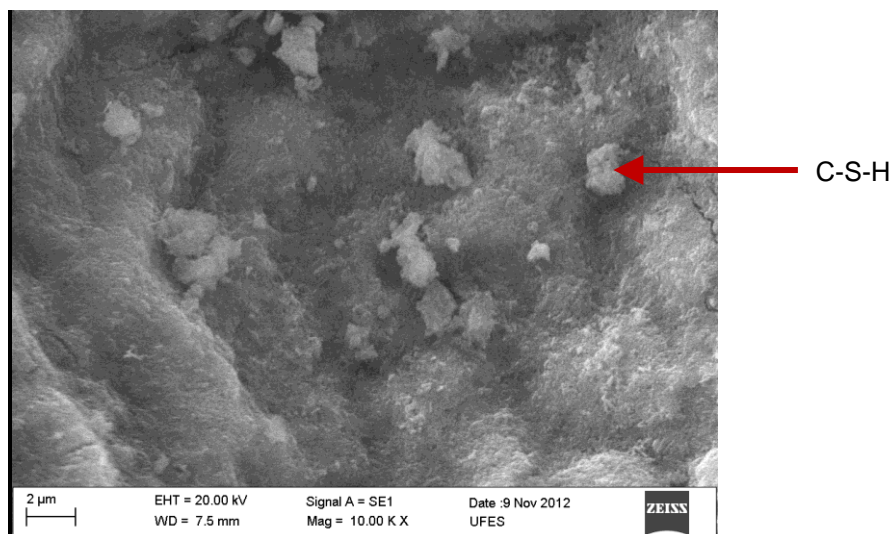
Fonte: Acervo Pessoal

As imagens microestruturais da argamassa de traço ARE 20 são apresentadas na figura 4.26. Aos 28 e 63 dias nota-se a formação de aglomerações de C-S-H nos poros da argamassa. Estes pequenos cristais fibrosos de C-S-H preenchem os poros, antes ocupados por água, durante a fase de hidratação do cimento, refinando estes poros e tornando a argamassa menos permeável. Esta formação também foi observada por Sobolev *et al.* (2007), Idir, Cyr e Tagnit-Hamou (2010) e Nassar e Soroushian (2012) durante análises microestruturais em seus estudos.

Figura 4.26 – Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 20 em diferentes idades.



a) 28 dias - ampliação 10000x



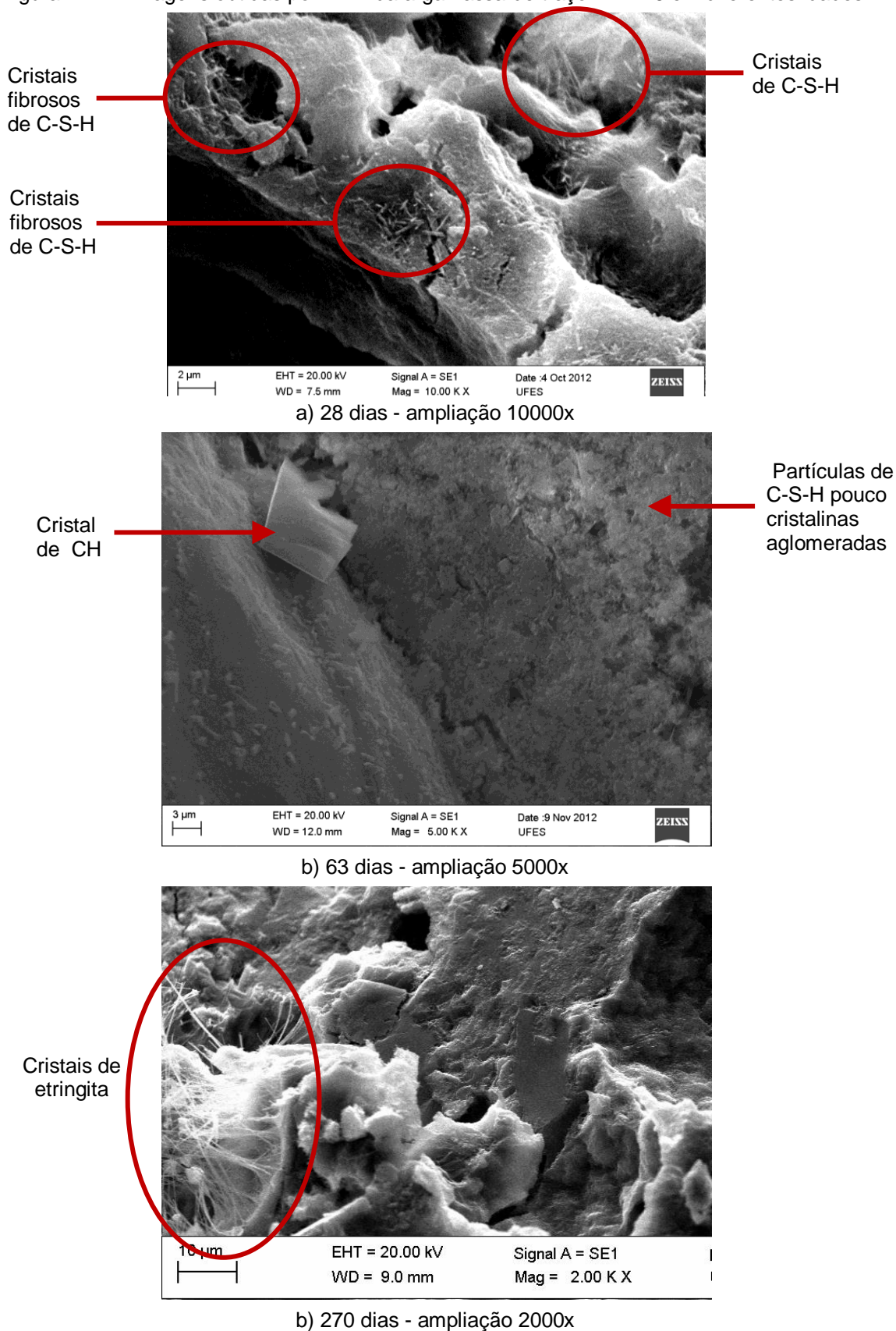
b) 63 dias - ampliação 10000x

Fonte: Acervo Pessoal

A figura 4.27 mostra as imagens da argamassa de traço ARE 26. Aos 28 dias nota-se, claramente, a formação de cristais fibrosos de C-S-H preenchendo os poros, antes ocupados por água, da argamassa. Aos 63 dias é possível notar uma pasta bem hidratada com partículas agregadas de C-S-H pouco cristalinas e cristais hexagonais de CH presentes na zona de transição entre a pasta e o agregado miúdo. Aos 270 dias, a argamassa de traço ARE 26 apresenta a formação de cristas de etringita tardia.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a formação de cristas de etringita tardia em idades avançadas pode estar associada à reação álcali-sílica. Em alguns casos a expansão associada a esta reação pode ser reduzida não gerando efeitos deletérios a matriz cimentícia. No caso desta argamassa, esta formação não pode ser considerada deletéria, pois a resistência à compressão axial da argamassa de traço ARE 26 aos 270 dias apresentou um acréscimo significativo, chegando a 45,3 MPa, o que pode ser atribuído as reações pozolânicas ocorridas.

Figura 4.27 – Imagens obtidas por MEV da argamassa de traço ARE 26 em diferentes idades.



Fonte: Acervo Pessoal

Apesar da baixa permeabilidade, consequência do refinamento dos poros causado pela formação de C-S-H adicional, observada nas argamassas de traços ARE 20 e ARE 26, a estrutura dessas argamassas apresentou-se com maior quantidade de poros, ou seja, menos permeável, porém mais porosa. Este fato corrobora com a queda nos valores de resistência à compressão axial dessas argamassas.

Essas e as demais micrografias feitas nas argamassas podem ser visualizadas na íntegra no Apêndice B.

Capítulo 5

Conclusões e Considerações Finais

5. Conclusões e Considerações Finais

No capítulo anterior foram apresentados, discutidos e analisados estatisticamente os resultados dos ensaios realizados, tanto para caracterização do resíduo de vidro laminado, quanto dos diferentes traços de argamassas de recuperação estrutural nos estados fresco e endurecido.

A análise microestrutural, apresentada e discutida também no capítulo 4, foi realizada com o intuito de entender o comportamento do resíduo na microestrutura da argamassa, promovendo ou não reações pozolânicas, preenchimento de vazios ou reações deletérias que influenciassem nas propriedades anteriormente analisadas.

O objetivo desta discussão foi avaliar o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação

estrutural, com o intuito de indicar a utilização deste resíduo como uma nova opção adição mineral, promover a redução da quantidade de cimento necessária para a produção das argamassas e propor uma solução para a deposição ambientalmente correta deste resíduo.

Neste capítulo, estão apresentadas as conclusões encontradas nesta pesquisa a partir da análise e discussão dos resultados, além de sugestões para estudos futuros nesta mesma linha de pesquisas.

5.1 Conclusão geral

A partir do objetivo proposto foi traçado o programa experimental, no qual os ensaios foram realizados e os resultados obtidos. Após a análise e discussão destes resultados observou-se que a substituição do cimento pelo resíduo de vidro laminado não surtiu efeitos positivos excepcionais nas argamassas de recuperação estrutural, mas também não produziu perdas significantes das propriedades físicas e mecânicas, o que significa que as características das argamassas com incorporação do resíduo de vidro laminado foram mantidas similares ao traço referência e compatíveis com valores adotados para argamassas de recuperação estrutural, na maioria dos casos.

Dessa forma, concluiu-se que os resultados desta pesquisa apontam o potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural, indicando a viabilidade de uso deste resíduo como substituto de materiais como a sílica ativa. 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 à caracterização do resíduo de vidro laminado

Os ensaios de caracterização do resíduo de vidro laminado permitiram identificar que quanto as características físicas ao equiparar a distribuição granulométrica do resíduo com a do cimento, o resíduo, com 98% das partículas abaixo de 75 μm , passou a apresentar superfície específica significativamente maior que a do cimento devido a maior irregularidade da partícula do resíduo de vidro.

A caracterização química deste resíduo confirmou este material como aceitável para fins cimentantes. Entretanto, o percentual de perda ao fogo encontrado na amostra do resíduo de vidro laminado foi alto, aproximadamente três vezes o percentual encontrado para o cimento CP V ARI utilizado, o que foi atribuído a presença de PVB, material polímero orgânico, na amostra do resíduo.

A caracterização mineralógica, feita por difração de raios-X, mostrou que o resíduo de vidro laminado está predominantemente no estado amorfo.

Assim, de acordo com a norma brasileira NBR 12653 – Materiais Pozolânicos - Especificação (ABNT, 1992) quanto as características físicas, químicas e mineralógicas, este resíduo finamente moído, pode ser considerado um material pozolânico, se o conteúdo alcalino for desconsiderado, atingindo um índice de atividade pozolânica igual a 86,36%, o que o torna uma alternativa de utilização como adição mineral.

5.2.2 Conclusões relativas às argamassas de recuperação estrutural em estado fresco

Durante o processo de preparação e moldagem dos corpos de prova dos diferentes traços de argamassa, o aumento do teor de substituição do resíduo de vidro laminado demandou a incorporação de maior quantidade de aditivo plastificante nos traços, para que o índice de consistência fosse mantido constante, ou seja, houve uma redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de resíduo nas argamassas. Esse fato pode ser explicado pela granulometria fina (abaixo de 75 μm) e alta superfície específica do resíduo.

Ainda no estado fresco, a massa específica das argamassas apresentou uma tendência de queda com o aumento do teor de resíduo incorporado, o que era

esperado, pois o resíduo de vidro laminado apresenta massa específica menor que a do cimento,

5.2.3 Conclusões relativas às argamassas de recuperação estrutural em estado endurecido

No estado endurecido foram verificadas propriedades mecânicas consideradas básicas para garantir um bom desempenho ao longo da vida útil das argamassas de recuperação estrutural, como resistência à compressão axial, módulo de elasticidade dinâmico, retração linear e resistência de aderência à tração, além da avaliação da permeabilidade, através do ensaio de absorção de água por capilaridade e as propriedades microestruturais destas argamassas.

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial foram satisfatórios para todas as argamassas ensaiadas, superando o valor de resistência de 30 MPa, mostrando-se compatíveis com a resistência à compressão de concretos utilizados em estruturas convencionais.

As argamassas com 7% de substituição obtiveram os resultados mais próximos aos das argamassas referência quanto ao desempenho mecânico, apresentando valor de resistência á compressão 6% superior aos das argamassas referência aos 270 dias, de módulo de elasticidade de, aproximadamente, 95% do módulo determinado para as argamassas referência aos 63 e 270 dias, e retração linear apenas 6% superior ao valor encontrado para as argamassas referência aos 63 dias.

As argamassas com 26% de substituição apresentaram resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade dinâmico superiores aos encontrados para as argamassas com 13 e 20% de substituição, porém inferiores aos valores obtidos para as argamassa com 7% de substituição e referência. Apresentando resultados de retração linear aos 63 dias 16% superior as argamassas referência.

As argamassas com 13% de substituição apresentaram os piores resultados quanto ao desempenho mecânico, exceto no ensaio de resistência de aderência à tração, em que obtiveram resultados superiores aos das argamassas referência.

Quanto à resistência de aderência à tração observou-se que a incorporação do resíduo de vidro influenciou significativamente os resultados deste ensaio, sendo que as argamassas com incorporação de vidro apresentaram maior resistência de aderência que as argamassas referência.

A permeabilidade das argamassas tende a diminuir com o aumento do teor de substituição, sendo que as argamassas com 20 e 26% de substituição apresentaram, após 72 horas de ensaio, resultados iguais a 67 e 77% dos valores de absorção de água por capilaridade encontrados para as argamassas referência. Essa baixa permeabilidade pode beneficiar as argamassas quanto aos parâmetros associados à durabilidade.

Quanto aos aspectos microestruturais, as argamassas com 7% de substituição foram as que apresentaram estrutura mais próxima a das argamassas referência, quanto a formação dos compostos resultantes da hidratação do cimento. A formação de cristais de C-S-H preenchendo os poros em idades mais avançadas, indicando a ocorrência de reações pozolânicas, foi observada tanto nas argamassas com 7% de substituição quanto nas argamassas com 26% de substituição do cimento por resíduo de vidro laminado.

Apesar da baixa permeabilidade, conseqüente do refinamento dos poros causado pela formação de C-S-H adicional, as argamassas com maiores teores de substituição de cimento por resíduo de vidro laminado apresentam a estrutura interna com maior quantidade de poros, o que pode explicar a tendência de queda da resistência das argamassas.

Sabendo que uma boa argamassa de recuperação estrutural deve apresentar baixa retração, resistência e módulo de elasticidade compatíveis ao substrato, boa aderência e baixa permeabilidade, e levando em conta a relação entre as argamassas com resíduo de vidro e a argamassa referência, as argamassas com 7% de substituição apresentaram os melhores resultados. Mas ao considerar a redução no consumo de cimento e a quantidade de resíduo incorporado é possível afirmar que as argamassas com 26% de substituição também se apresentam como uma opção apropriada, desconsiderando os resultados de retração.

5.3 Sugestões para futuros estudos

A partir do tema desta pesquisa sugerem-se alguns assuntos futuros, que seriam enriquecedores para um melhor conhecimento do comportamento do resíduo de vidro laminado em matrizes cimentícias, especialmente em argamassas de recuperação estrutural.

- Análise de outras faixas granulométricas, mais finas que a utilizada nesta pesquisa, principalmente relacionadas ao estudo do resíduo de vidro ultrafino.
- Análise do uso deste resíduo como adição, ao invés de substituição, em baixos percentuais, em argamassas de recuperação estrutural.
- Análise da condutividade térmica e do coeficiente de dilatação térmica das argamassas com incorporação de resíduo de vidro laminado.
- Análise de parâmetros relativos à durabilidade das argamassas produzidas com este resíduo como a suscetibilidade à permeabilidade de cloretos, resistência à sulfatos e carbonatação.
- Investigação de possíveis expansões devido à ocorrência de reações alcali-sílica.
- Estudos mais minuciosos e detalhados do ponto de vista microestrutural.

São sugeridas também pesquisas que estudem e proponham normas para avaliação do desempenho de argamassas de recuperação estrutural.

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

_____. **NBR 7211** - Agregados para concreto. São Paulo, 2009.

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

_____. **NBR 9202** - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (n° 325) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1985.

_____. **NBR 9491** - Vidros de segurança para veículos rodoviários — Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 9779** - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

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

_____. **NBR 11579** - Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (n° 200) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

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

_____. **NBR 13276** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13528** - Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 14081-2** - Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Parte 2: Execução do substrato-padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **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 15261** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear) Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15630** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

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

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

_____. **NBR NM 49** - Agregado miúdo. Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR NM 65** - Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. **ANUÁRIO ABIVIDRO 2008**. Disponível em: <http://www.abividro.org.br>, acesso em 23 de outubro de 2010.

AL-ZHRANI, M. M.; MASLEHUDDIN, M.; AL-DULAIJAN, S.U.; IBRAHIM, M. Mechanical properties and durability characteristics of polymer- and cement-based repair materials. **Cement and Concrete Composites**, v.25, p. 527-537, 2003.

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**, 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

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: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: IBRACON, 2011.

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

BASTOS, P.K.X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. 172p. Tese (Doutorado em Engenharia)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, São Paulo, 2001.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: Patologia, reabilitação, Prevenção**. Tradução: Leda Maria Marques Dias Beck – São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

BORJA, E. V.; ANJOS, M. A. S.; SILVA, I. D. G.; CUNHA JUNIOR, M. D.; SANTOS JUNIOR, J. T. S. Argamassas para reforço estrutural com incorporação de adições minerais. In: 54º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2012, Maceió. **Anais**. Maceió: IBRACON, 2012.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 3 de ago. 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 307, de 05 de julho de 2002**. Disponível em www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html, acesso em 23 de outubro de 2010.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 348, de 16 de agosto de 2004.** Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=449>, acesso em 15 de janeiro de 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 431, de 24 de maio de 2011.** Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=649>, acesso em 15 de janeiro de 2013.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução no 448, de 18 de janeiro de 2012.** Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res12/Resol448.pdf>, acesso em 15 de janeiro de 2013.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos.** 187p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

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, v. 2, p. 1590-1627, 2007.

CARASEK, H. Argamassas. 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. 2, p. 863-904, 2007.

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.

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

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.

FELEKOĞLU, B.; TOSUN, K.; BARADAN, B.; ALTUN, A.; UYULGAN, B. The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 36, p. 1719–1726, 2006.

GAIER, C. V. **Análise do desempenho de materiais de reparo industrializados para estruturas de concreto frente ao ataque ácido**. 153p. Trabalho de conclusão (Mestrado profissional). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

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. In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2011, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: IBRACON, 2011.

GUIA DO VIDRO. Portal Guia do Vidro. Disponível em <http://www.guiadovidro.com.br/>, acesso em 28 de setembro de 2011.

HELENE, P. R. L.. **Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

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

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

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 113p. Tese (Livre Docência)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

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

KORMANN, A. C. M. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. 203p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

LAM, C. S.; POON, C. S.; CHAN, D. Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass - ARS consideration. **Cement and Concrete Composites**, v.29, p. 616-625, 2007.

LATORRE, P. E. V. **Estudo de argamassas para reparos de estruturas de concreto sujeitas à abrasão, em locais com umidade elevada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

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.

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.

MATTOS, F. V. **Contribuição ao estudo de argamassas de recuperação superficial em estruturas de concreto armado**. 193 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.

MEDEIROS, B. L. **Estruturas subterrâneas de concreto: levantamento de manifestações patológicas na região metropolitana de Curitiba e análise de sistemas de reparo**. 143p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

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.

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

PARK, S. B.; LEE, B. C. Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 1145-1152, 2004.

PEÑA, M. R. G. **Estudo da fissuração associada a retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PENACHO, P. M. **Desempenho de argamassas com incorporação de resíduos finos de vidro: Reciclagem de agregados (RCD) e reacção álcalis-sílica (RAS)**. 292p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

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. T. **Projetos de Experimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2010.

SALOMÃO, M. C. F.; DIAS, J. F.; MARTINS, J. A. L. G.; SILVA, T. J. Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: IBRACON, 2010.

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

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

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, p. 655-691, 2007.

SILVA JUNIOR, J. Z. R.; HELENE, P. **Argamassas de Reparo**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo: EPUSP, 2001.

SOBOLEV, K.; TÜRKER, P.; SOBOLEVA, S.; ISCIOGLU, G. Utilization of waste glass in ECO-cement: Strength properties and microstructural observations. **Waste Management**, v. 27, p. 971-976, 2007.

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

VASKE, N.R.; CAMPAGNOLO, J.L.; DAL MOLIN, D.C.C. Aplicação da argamassa com adição de sílica ativa como material de reforço em elementos comprimidos de concreto. **Ambiente Construído**, v. 8, n.3, p. 77-93, 2008.

WANG, H. The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v.25, p. 791-797, 2011.

Apêndices

*Resultados individuais dos ensaios realizados nas
argamassas no estado endurecido.
Micrografias das argamassas.*

APÊNDICE A - Resultados individuais dos ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

APÊNDICE A

A. RESULTADOS INDIVIDUAIS DOS ENSAIOS REALIZADOS NAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A.1 Determinação da resistência à compressão axial

Tabela A.1.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial* para a argamassa referência aos 7 e 28 dias.

ARE 0 - 7 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	7200	A (cônica)	102	36,04	36,51
02	50	7150	A (cônica)	104,9	35,79	
03	50	7430	A (cônica)	104,3	37,19	
04	50	6660	D (cisalhada)	104,4	33,34	
05	50	5560	D (cisalhada)	105,7	27,83**	
06	50	6470	D (cisalhada)	105	32,39**	
01R	50	7510	A (cônica)	97	37,59	
02R	50	6260	A (cônica)	97	31,33**	
03R	50	7370	A (cônica)	98	36,89	
04R	50	7210	A (cônica)	98	36,09	
05R	50	7820	A (cônica)	98	39,14	
06R	50	6320	A (cônica)	97	31,63**	
CV: 4,59%						
Desvio padrão: 1,68						
ARE 0 - 28 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	7793	A (cônica)	90	39,01	40,40
02	50	7016	A (cônica)	90	35,12**	
03	50	7626	A (cônica)	90	38,17	
04	50	6563	A (cônica)	90	32,85**	
05	50	6012	D (cisalhada)	90	30,09**	
06	50	7114	A (cônica)	90	35,61**	
01R	50	7800	A (cônica)	96	39,04	
02R	50	8167	A (cônica)	96	40,88	
03R	50	9260	A (cônica)	96	46,35**	
04R	50	8585	A (cônica)	96	42,97	
05R	50	9206	A (cônica)	95	46,08**	
06R	50	8456	A (cônica)	96	42,32	
CV: 4,86%						
Desvio padrão: 1,96						

Nota:

R – repetição; CV – Coeficiente de variação.

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

** Resultados individuais desprezados no cálculo da média e na análise estatística.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.1.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial* para a argamassa referência aos 63 e 270 dias.

ARE 0 - 63 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	9414	A (cônica)	95	47,12	47,53
02	50	9280	A (cônica)	96	46,45	
03	50	9563	A (cônica)	95	47,87	
04	50	9840	A (cônica)	98	49,25	
05	50	8310	A (cônica)	97	41,60	
06	50	8870	A (cônica)	100	44,40	
01R	50	9760	A (cônica)	97	48,85	
02R	50	9781	A (cônica)	95	48,96	
03R	50	9827	A (cônica)	96	49,19	
04R	50	9886	A (cônica)	96	49,49	
05R	50	9821	A (cônica)	95	49,16	CV: 5,02%
06R	50	9588	A (cônica)	96	47,99	Desvio padrão: 2,39
ARE 0 - 270 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	10450	A (cônica)	99	52,31	53,48
02	50	10850	A (cônica)	98	54,31	
03	50	10300	A (cônica)	97	51,56	
04	50	10400	A (cônica)	98	52,06	
05	50	11550	A (cônica)	99	57,81	
06	50	10550	A (cônica)	98	52,81	
						CV: 4,34%
						Desvio padrão: 2,32

Nota:

R – repetição; CV – Coeficiente de variação.

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

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.1.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial* para a argamassa com traço ARE 7 aos 7, 28, 63 e 270 dias.

ARE 7 - 7 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	5960	A (cônica)	97	29,83	31,27
02	50	5740	A (cônica)	98	28,73	
03	50	5610	A (cônica)	99	28,08**	
04	50	6180	A (cônica)	98	30,93	
05	50	5200	D (cisalhada)	98	26,03**	
06	50	5580	A (cônica)	98	27,93**	
01R	50	6090	A (cônica)	98	30,48	
02R	50	6390	A (cônica)	99	31,98	
03R	50	6490	A (cônica)	98	32,49	
04R	50	6370	A (cônica)	98	31,88	
05R	50	6530	A (cônica)	98	32,69	
06R	50	6470	A (cônica)	97	32,39	
						CV: 4,36%
						Desvio padrão: 1,36
ARE 7 - 28 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	7658	A (cônica)	95	38,33	39,74
02	50	8134	A (cônica)	95	40,72	
03	50	7960	A (cônica)	97	39,84	
04	50	7969	A (cônica)	96	39,89	
05	50	7840	A (cônica)	96	39,24	
06	50	8078	A (cônica)	96	40,43	
						CV: 2,17%
						Desvio padrão: 0,86
ARE 7 - 63 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	7688	A (cônica)	95	38,48	39,24
02	50	7949	A (cônica)	96	39,79	
03	50	7750	A (cônica)	96	38,79	
04	50	7626	A (cônica)	94	38,17	
05	50	7936	A (cônica)	95	39,72	
06	50	8085	A (cônica)	95	40,47	
						CV: 2,27%
						Desvio padrão: 0,89
ARE 7 - 270 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6450	D (cisalhada)	98	32,29**	56,66
02	50	11400	A (cônica)	98	57,06	
03	50	11300	A (cônica)	98	56,56	
04	50	11300	A (cônica)	98	56,56	
05	50	11100	A (cônica)	97	55,56	
06	50	11500	A (cônica)	99	57,56	
						CV: 1,31%
						Desvio padrão: 0,74

Nota:

R – repetição; CV – Coeficiente de variação.

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

** Resultados individuais desprezados no cálculo da média e na análise estatística.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.1.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial* para a argamassa com traço ARE 13 aos 7, 28, 63 e 270 dias.

ARE 13 - 7 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6944	A (cônica)	95	34,76	37,19 CV: 4,45% Desvio padrão: 1,65
02	50	7519	A (cônica)	95	37,64	
03	50	7936	A (cônica)	95	39,72	
04	50	7341	A (cônica)	95	36,74	
05	50	7279	A (cônica)	94	36,44	
06	50	7559	A (cônica)	95	37,84	
ARE 13 - 28 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6350	A (cônica)	98	31,78	29,84 CV: 5,5% Desvio padrão: 1,64
02	50	6350	A (cônica)	98	31,78	
03	50	5690	A (cônica)	97	28,48	
04	50	5970	A (cônica)	98	29,88	
05	50	5580	A (cônica)	98	27,93	
06	50	5830	A (cônica)	98	29,18	
ARE 13 - 63 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6700	A (cônica)	98	33,54	34,96 CV: 3,55% Desvio padrão: 1,24
02	50	6955	A (cônica)	96	34,81	
03	50	6696	A (cônica)	95	33,52	
04	50	7150	A (cônica)	97	35,79	
05	50	7303	A (cônica)	96	36,55	
06	50	7104	A (cônica)	96	35,56	
ARE 13 - 270 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6200	D (cisalhada)	99	31,03**	36,44 CV: 2,97% Desvio padrão: 1,08
02	50	7300	A (cônica)	97	36,54	
03	50	7250	A (cônica)	99	36,29	
04	50	7350	A (cônica)	99	36,79	
05	50	6950	A (cônica)	98	34,79	
06	50	7550	A (cônica)	99	37,79	

Nota:

R – repetição; CV – Coeficiente de variação.

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

** Resultados individuais desprezados no cálculo da média e na análise estatística.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.1.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial* para a argamassa com traço ARE 20 aos 7, 28, 63 e 270 dias.

ARE 20 - 7 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6816	A (cônica)	95	34,12	33,15 CV: 2,33% Desvio padrão: 0,77
02	50	6566	A (cônica)	95	32,86	
03	50	6735	A (cônica)	95	33,71	
04	50	6687	A (cônica)	95	33,47	
05	50	6547	A (cônica)	94	32,77	
06	50	6388	A (cônica)	95	31,97	
ARE 20 - 28 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6700	A (cônica)	97	33,54	32,84 CV: 3,74% Desvio padrão: 1,23
02	50	6800	A (cônica)	97	34,04	
03	50	6700	A (cônica)	97	33,54	
04	50	6320	A (cônica)	97	31,63	
05	50	6650	A (cônica)	97	33,29	
06	50	6190	A (cônica)	97	30,98	
ARE 20 - 63 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	7979	A (cônica)	96	39,94	40,18 CV: 2,22% Desvio padrão: 0,89
02	50	8210	A (cônica)	97	41,09	
03	50	7849	A (cônica)	96	39,29	
04	50	7800	A (cônica)	96	39,04	
05	50	8130	A (cônica)	97	40,69	
06	50	8200	A (cônica)	97	41,04	
ARE 20 - 270 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	8750	A (cônica)	98	43,80	42,24 CV: 2,69% Desvio padrão: 1,14
02	50	8100	A (cônica)	98	40,54	
03	50	8300	A (cônica)	97	41,55	
04	50	8450	A (cônica)	99	42,30	
05	50	8600	A (cônica)	98	43,05	
06	50	8432	A (cônica)	94	42,21	

Nota:

R – repetição; CV – Coeficiente de variação.

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

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.1.6 - Resultados individuais do ensaio para determinação da resistência à compressão axial* para a argamassa com traço ARE 26 aos 7, 28, 63 e 270 dias.

ARE 26 - 7 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	5558	A (cônica)	95	27,82	31,16 CV: 5,74% Desvio padrão: 1,79
02	50	6497	A (cônica)	94	32,52	
03	50	6350	A (cônica)	97	31,78	
04	50	6389	A (cônica)	96	31,98	
05	50	6091	A (cônica)	95	30,49	
06	50	6470	A (cônica)	98	32,39	
ARE 26 - 28 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	6995	A (cônica)	96	35,01	33,52 CV: 5,88% Desvio padrão: 1,97
02	50	6950	A (cônica)	97	34,79	
03	50	6985	A (cônica)	96	34,96	
04	50	6036	A (cônica)	91	30,21	
05	50	6399	A (cônica)	96	32,03	
06	50	6816	A (cônica)	96	34,12	
ARE 26 - 63 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	7291	A (cônica)	95	36,50	38,57 CV: 5,09% Desvio padrão: 1,96
02	50	7529	A (cônica)	95	37,69	
03	50	8028	A (cônica)	96	40,19	
04	50	7283	A (cônica)	96	36,46	
05	50	8207	A (cônica)	96	41,08	
06	50	7886	A (cônica)	95	39,47	
ARE 26 - 270 dias						
CP	Diâmetro médio (mm)	Carga (Kgf)	Tipo de ruptura	Altura (mm)	Resistência (MPa)	Resistência média (MPa)
01	50	8950	A (cônica)	98	44,80	45,30 CV: 2,21% Desvio padrão: 1,00
02	50	9200	A (cônica)	98	46,05	
03	50	9200	A (cônica)	99	46,05	
04	50	8700	A (cônica)	98	43,55	
05	50	9050	A (cônica)	99	45,30	
06	50	9200	A (cônica)	99	46,05	

Nota:

R – repetição; CV – Coeficiente de variação.

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

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

A.2 Determinação do módulo de elasticidade dinâmico

Tabela A.2.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico* para a argamassa referência aos 28, 63 e 270 dias.

ARE 0 - 28 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	96	4,404	35,24	35,72 CV: 1,99% Desvio padrão: 0,71
02	50	96	4,404	35,24	
03	50	96	4,486	36,56	
04	50	96	4,384	34,92	
05	50	95	4,439	35,80	
06	50	96	4,486	36,56	
ARE 0 - 63 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	97	4,450	35,98	36,10 CV: 1,01% Desvio padrão: 0,37
02	50	95	4,439	35,80	
03	50	96	4,486	36,56	
04	50	96	4,486	36,56	
05	50	95	4,439	35,80	
06	50	96	4,444	35,88	
ARE 0 - 270 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	99	4,521	37,13	37,65 CV: 2,34% Desvio padrão: 0,88
02	50	98	4,579	38,09	
03	50	97	4,533	37,33	
04	50	98	4,475	36,38	
05	50	99	4,626	38,88	
06	50	98	4,579	38,09	

Nota:

O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15630 (ABNT, 2008) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.2.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico* para a argamassa com traço ARE 7 aos 28, 63 e 270 dias.

ARE 7 - 28 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	95	4,358	35,14	34,71 CV: 3,03% Desvio padrão: 1,05
02	50	95	4,378	35,46	
03	50	97	4,254	33,48	
04	50	96	4,286	33,99	
05	50	96	4,424	36,21	
06	50	96	4,286	33,99	
ARE 7 - 63 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	95	4,378	35,46	34,12 CV: 2,39% Desvio padrão: 0,82
02	50	96	4,286	33,99	
03	50	96	4,305	34,29	
04	50	94	4,312	34,40	
05	50	95	4,241	33,28	
06	50	95	4,241	33,28	
ARE 7 - 270 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	98	4,206	32,73	36,31 CV: 9,19% Desvio padrão: 3,34
02	50	98	4,579	38,79	
03	50	98	4,118	31,38	
04	50	98	4,579	38,79	
05	50	97	4,533	38,02	
06	50	99	4,541	38,15	

Nota:

O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15630 (ABNT, 2008) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.2.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico* para a argamassa com traço ARE 13 aos 28, 63 e 270 dias.

ARE 13 - 28 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	98	4,206	30,94	30,88 CV: 0,97% Desvio padrão: 0,30
02	50	98	4,206	30,94	
03	50	97	4,163	30,31	
04	50	98	4,224	31,21	
05	50	98	4,206	30,94	
06	50	98	4,206	30,94	
ARE 13 - 63 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	98	4,188	30,68	30,78 CV: 0,33% Desvio padrão: 1,08
02	50	96	4,192	30,74	
03	50	95	4,167	30,37	
04	50	97	4,236	31,39	
05	50	96	4,192	30,74	
06	50	96	4,192	30,74	
ARE 13 - 270 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	99	4,249	31,58	30,26 CV: 2,24% Desvio padrão: 0,68
02	50	97	4,163	30,31	
03	50	99	4,142	30,01	
04	50	99	4,142	30,01	
05	50	98	4,118	29,66	
06	50	99	4,142	30,01	

Nota:

O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15630 (ABNT, 2008) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.2.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico* para a argamassa com traço ARE 20 aos 28, 63 e 270 dias.

ARE 20 - 28 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	97	4,163	30,38	30,29 CV: 0,44% Desvio padrão: 0,13
02	50	97	4,163	30,38	
03	50	97	4,145	30,12	
04	50	97	4,163	30,38	
05	50	97	4,145	30,12	
06	50	97	4,163	30,38	
ARE 20 - 63 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	96	4,286	32,20	32,06 CV: 1,68% Desvio padrão: 0,54
02	50	97	4,236	31,45	
03	50	96	4,286	32,20	
04	50	96	4,286	32,20	
05	50	97	4,236	31,45	
06	50	97	4,330	32,87	
ARE 20 - 270 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	98	4,279	32,10	31,87 CV: 2,05% Desvio padrão: 0,65
02	50	98	4,395	31,01	
03	50	99	4,323	31,45	
04	50	98	4,298	31,65	
05	50	99	4,342	32,10	
06	50	99	4,323	32,90	

Nota:

O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15630 (ABNT, 2008) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.2.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico* para a argamassa com traço ARE 26 aos 28, 63 e 270 dias.

ARE 26 - 28 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	96	4,286	32,33	32,38 CV: 4,90% Desvio padrão: 1,59
02	50	97	4,236	31,58	
03	50	96	4,192	30,93	
04	50	91	4,483	35,37	
05	50	96	4,305	32,61	
06	50	96	4,229	31,47	
ARE 26 - 63 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	95	4,338	33,12	33,32 CV: 1,67% Desvio padrão: 0,56
02	50	95	4,358	33,42	
03	50	96	4,384	33,82	
04	50	96	4,286	32,33	
05	50	96	4,384	33,82	
06	50	95	4,358	33,42	
ARE 26 - 270 dias					
CP	Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Velocidade de pulso (Km/s)	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	Módulo de elasticidade média (GPa)
01	50	98	4,279	32,22	32,95 CV: 1,86% Desvio padrão: 0,61
02	50	98	4,395	33,99	
03	50	99	4,323	32,89	
04	50	98	4,298	32,51	
05	50	99	4,342	33,18	
06	50	99	4,323	32,89	

Nota:

O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,2.

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15630 (ABNT, 2008) – Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

A.3 Determinação da retração linear

Tabela A.3.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear* para a argamassa referência aos 1, 7, 28 e 63 dias.

ARE 0 – 1 dia				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,352	-0,313 CV: 9,28% Desvio padrão: 0,029	-1,20	-1,19 CV: 5,02% Desvio padrão: 0,060
02	-0,320		-1,27	
03	-0,332		-1,24	
04	-0,304		-1,19	
05	-0,268		-1,14	
06	-0,300		-1,11	
ARE 0 - 7 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,716	-0,661 CV: 7,09% Desvio padrão: 0,047	-2,41	-2,42 CV: 2,70% Desvio padrão: 0,065
02	-0,688		-2,50	
03	-0,576		-2,50	
04	-0,664		-2,42	
05	-0,660		-2,36	
06	-0,664		-2,35	
ARE 0 - 28 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,920	-0,835 CV: 5,34% Desvio padrão: 0,045	-3,22	-3,24 CV: 1,84% Desvio padrão: 0,060
02	-0,828		-3,32	
03	-0,844		-3,31	
04	-0,808		-3,23	
05	-0,796		-3,18	
06	-0,816		-3,19	
ARE 0 - 63 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-1,036	-0,927 CV: 6,07% Desvio padrão: 0,056	-3,49	-3,53 CV: 1,53% Desvio padrão: 0,054
02	-0,920		-3,60	
03	-0,932		-3,59	
04	-0,884		-3,51	
05	-0,904		-3,47	
06	-0,888		-3,51	

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15261 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.3.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear* para a argamassa para a argamassa com traço ARE 7 aos 1, 7, 28 e 63 dias.

ARE 7 – 1 dia				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,376	-0,328 CV: 8,23% Desvio padrão: 0,027	-1,32	-1,25 CV: 5,69% Desvio padrão: 0,071
02	-0,312		-1,27	
03	-0,316		-1,27	
04	---		---	
05	-0,320		-1,24	
06	-0,316		-1,13	
ARE 7 - 7 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,844	-0,750 CV: 7,34% Desvio padrão: 0,055	-2,82	-2,65 CV: 4,45% Desvio padrão: 0,118
02	-0,716		-2,65	
03	-0,724		-2,66	
04	---		---	
05	-0,752		-2,62	
06	-0,712		-2,49	
ARE 7 - 28 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,992	-0,904 CV: 6,20% Desvio padrão: 0,056	-3,57	-3,43 CV: 2,93% Desvio padrão: 0,101
02	-0,868		-3,44	
03	-0,860		-3,46	
04	---		---	
05	-0,928		-3,41	
06	-0,872		-3,29	
ARE 7 - 63 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-1,092	-0,991 CV: 6,30% Desvio padrão: 0,062	-3,72	-3,63 CV: 2,09% Desvio padrão: 0,076
02	-0,956		-3,64	
03	-0,952		-3,68	
04	---		---	
05	-1,012		-3,61	
06	-0,944		-3,52	

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15261 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.3.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear* para a argamassa para a argamassa com traço ARE 13 aos 1, 7, 28 e 63 dias.

ARE 13 – 1 dia				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,356	-0,348 CV: 11,64% Desvio padrão: 0,040	-1,36	-1,36 CV: 2,46% Desvio padrão: 0,033
02	-0,400		-1,40	
03	-0,364		-1,36	
04	-0,292		-1,38	
05	-0,328		-1,31	
06	---		---	
ARE 13 - 7 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,860	-0,832 CV: 5,85% Desvio padrão: 0,049	-2,93	-2,98 CV: 1,71% Desvio padrão: 0,051
02	-0,884		-3,01	
03	-0,856		-3,01	
04	-0,780		-3,03	
05	-0,780		-2,92	
06	---		---	
ARE 13 - 28 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,984	-0,965 CV: 4,95% Desvio padrão: 0,048	-3,58	-3,63 CV: 1,41% Desvio padrão: 0,051
02	-1,016		-3,63	
03	-0,996		-3,69	
04	-0,912		-3,66	
05	-0,916		-3,57	
06	---		---	
ARE 13 - 63 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-1,092	-1,063 CV: 3,94% Desvio padrão: 0,042	-3,66	-3,70 CV: 1,36% Desvio padrão: 0,050
02	-1,104		-3,69	
03	-1,084		-3,78	
04	-1,020		-3,72	
05	-1,016		-3,66	
06	---		---	

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15261 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.3.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear* para a argamassa para a argamassa com traço ARE 20 aos 1, 7, 28 e 63 dias.

ARE 20 – 1 dia				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,276	-0,349 CV: 10,54% Desvio padrão: 0,037	-1,57	-1,65 CV: 3,18% Desvio padrão: 0,053
02	-0,368		-1,61	
03	-0,368		-1,66	
04	-0,368		-1,67	
05	-0,368		-1,72	
06	-0,348		-1,67	
ARE 20 - 7 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,808	-0,844 CV: 3,93% Desvio padrão: 0,033	-3,32	-3,35 CV: 1,03% Desvio padrão: 0,034
02	-0,840		-3,34	
03	-0,868		-3,39	
04	-0,848		-3,35	
05	-0,892		-3,38	
06	-0,808		-3,30	
ARE 20 - 28 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,944	-0,974 CV: 3,87% Desvio padrão: 0,038	-3,96	-3,97 CV: 0,95% Desvio padrão: 0,038
02	-0,984		-3,97	
03	-1,000		-4,02	
04	-1,004		-3,97	
05	-1,000		-4,00	
06	-0,912		-3,91	
ARE 20 - 63 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-1,032	-1,068 CV: 3,86% Desvio padrão: 0,041	-4,01	-4,02 CV: 0,84% Desvio padrão: 0,034
02	-1,080		-4,01	
03	-1,096		-4,06	
04	-1,112		-4,01	
05	-1,084		-4,04	
06	-1,004		-3,96	

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15261 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.3.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação de retração linear* para a argamassa para a argamassa com traço ARE 26 aos 1, 7, 28 e 63 dias.

ARE 26 – 1 dia				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,344	-0,308 CV: 13,24% Desvio padrão: 0,041	-1,85	-1,92 CV: 2,74% Desvio padrão: 0,053
02	-0,272		-1,89	
03	-0,256		-1,94	
04	---		---	
05	-0,332		-1,97	
06	-0,336		-1,97	
ARE 26 - 7 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,824	-0,864 CV: 8,28% Desvio padrão: 0,071	-3,59	-3,65 CV: 1,08% Desvio padrão: 0,039
02	-0,836		-3,65	
03	-0,984		-3,68	
04	---		---	
05	-0,872		-3,69	
06	-0,804		-3,64	
ARE 26 - 28 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-0,936	-0,986 CV: 9,42% Desvio padrão: 0,093	-4,16	-4,20 CV: 0,73% Desvio padrão: 0,030
02	-0,968		-4,23	
03	-1,144		-4,22	
04	---		---	
05	-0,980		-4,20	
06	-0,904		-4,17	
ARE 26 - 63 dias				
CP	Varição dimensional (mm/m)	Varição dimensional média (mm/m)	Varição de massa (%)	Varição de massa média (%)
01	-1,040	-1,082 CV: 10,28% Desvio padrão: 0,111	-4,17	-4,20 CV: 0,77% Desvio padrão: 0,032
02	-1,056		-4,24	
03	-1,272		-4,23	
04	---		---	
05	-1,060		-4,18	
06	-0,980		-4,18	

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 15261 (ABNT, 2005) - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

A.4 Determinação da absorção de água por capilaridade

Tabela A.4.1 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade* para a argamassa referência.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					Ascensão capilar às 72hs (mm)
	3 hs	6 hs	24 hs	48hs	72 hs	
01	0,165	0,254	0,601	0,830	0,992	70
02	0,175	0,259	0,565	0,783	0,945	65
03	0,318	0,452	0,867	1,112	1,284	100
04	0,223	0,320	0,652	0,879	1,028	75
05	0,277	0,397	0,763	1,001	1,175	85
06	0,269	0,368	0,701	0,952	1,127	85
Média	0,238	0,342	0,692	0,926	1,092	80
CV	25,51%	23,02%	16,07%	13,03%	11,63%	15,81%
Desvio Padrão	0,061	0,079	0,111	0,121	0,127	12,65

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 9779 (ABNT, 1995) - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.

Tabela A.4.2 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade* a argamassa com traço ARE 7.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					Ascensão capilar às 72hs (mm)
	3 hs	6 hs	24 hs	48hs	72 hs	
01	0,201	0,289	0,578	0,78	0,941	65
02	0,202	0,291	0,595	0,812	0,973	65
03	0,294	0,407	0,75	1,02	1,199	80
04	0,214	0,308	0,624	0,835	0,986	70
05	0,333	0,457	0,862	1,105	1,271	85
06	0,346	0,475	0,867	1,105	1,269	85
Média	0,265	0,371	0,713	0,943	1,107	75
CV	25,42%	23,05%	18,55%	16,00%	14,10%	12,65%
Desvio Padrão	0,067	0,086	0,132	0,151	0,156	9,49

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 9779 (ABNT, 1995) - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.4.3 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade* a argamassa com traço ARE 13.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					Ascensão capilar às 72hs (mm)
	3 hs	6 hs	24 hs	48hs	72 hs	
01	0,226	0,329	0,632	0,869	0,969	65
02	0,249	0,358	0,659	0,89	1,003	65
03	0,379	0,516	0,876	1,187	1,310	95
04	0,372	0,501	0,844	1,130	1,247	90
05	0,422	0,578	0,990	1,322	1,440	100
06	0,490	0,653	1,062	1,388	1,483	100
Média	0,356	0,489	0,844	1,131	1,242	86
CV	28,47%	25,61%	20,46%	19,06%	17,40%	19,29%
Desvio Padrão	0,101	0,125	0,173	0,216	0,216	16,56

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 9779 (ABNT, 1995) - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.

Tabela A.4.4 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade* a argamassa com traço ARE 20.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					Ascensão capilar às 72hs (mm)
	3 hs	6 hs	24 hs	48hs	72 hs	
01	0,157	0,224	0,45	0,621	0,704	45
02	0,200	0,275	0,51	0,693	0,772	45
03	0,201	0,276	0,482	0,637	0,705	45
04	0,158	0,242	0,483	0,641	0,725	45
05	0,228	0,313	0,55	0,702	0,771	45
06	0,178	0,253	0,495	0,657	0,721	45
Média	0,187	0,264	0,495	0,659	0,733	45
CV	14,87%	11,83%	6,75%	4,93%	4,23%	0,00%
Desvio Padrão	0,028	0,031	0,033	0,032	0,031	0,00

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 9779 (ABNT, 1995) - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.

APÊNDICE A – Resultados dos ensaios realizados nas argamassas

Tabela A.4.5 - Resultados individuais do ensaio para determinação de absorção de água por capilaridade* a argamassa com traço ARE 26.

CP	Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)					Ascensão capilar às 72hs (mm)
	3 hs	6 hs	24 hs	48hs	72 hs	
01	0,238	0,31	0,554	0,716	0,791	40
02	0,23	0,313	0,564	0,775	0,861	50
03	0,283	0,376	0,686	0,911	0,996	60
04	0,236	0,32	0,55	0,71	0,783	40
05	0,256	0,334	0,561	0,716	0,786	45
06	0,257	0,341	0,582	0,747	0,821	50
Média	0,25	0,33	0,58	0,76	0,84	47,5
CV	7,83%	7,38%	8,88%	10,08%	9,78%	15,96%
Desvio Padrão	0,020	0,025	0,052	0,077	0,082	7,58

Nota:

CV – Coeficiente de variação.

* Norma adotada - NBR 9779 (ABNT, 1995) - Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade.

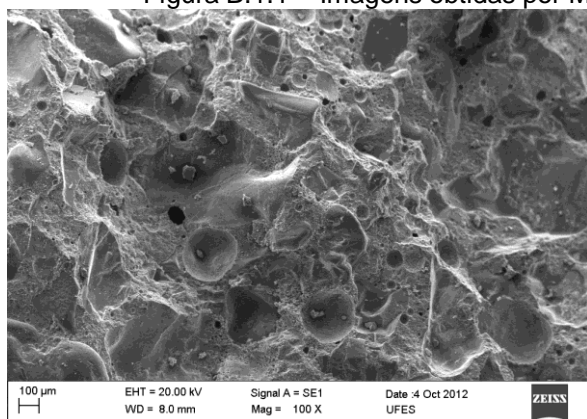
APÊNDICE B – Micrografias das argamassas

APÊNDICE B

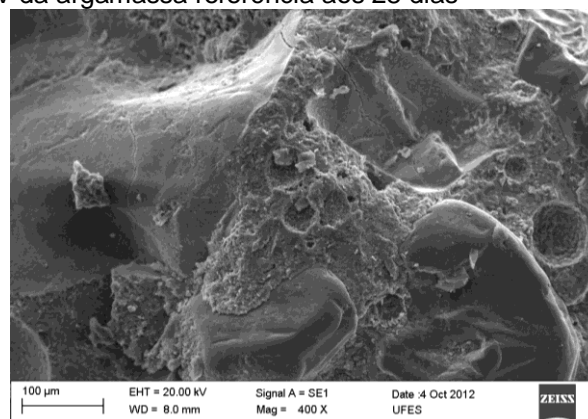
B. MICROGRAFIAS DAS ARGAMASSAS

B.1 Micrografias da argamassa referência

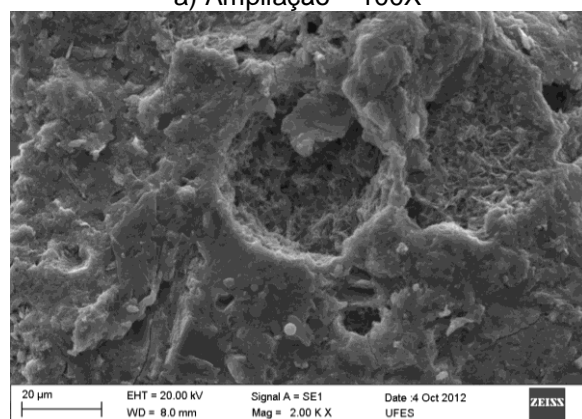
Figura B.1.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 28 dias



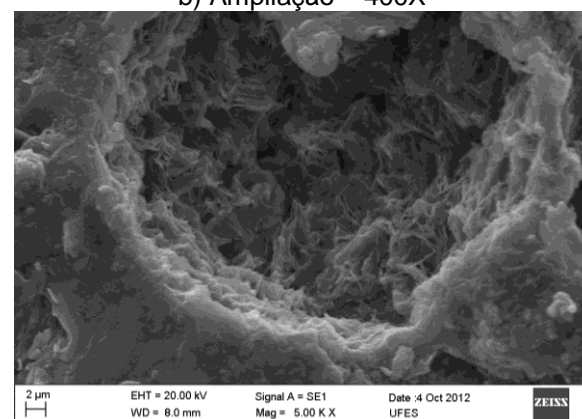
a) Ampliação – 100X



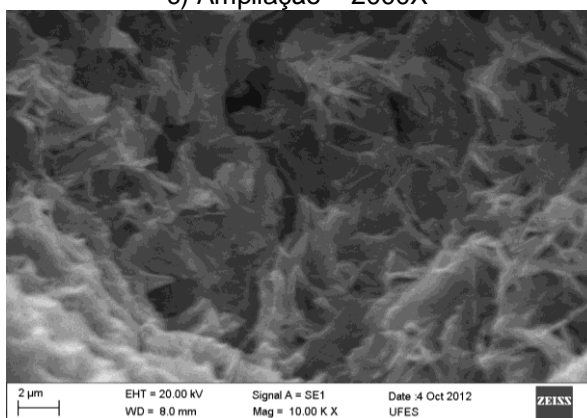
b) Ampliação – 400X



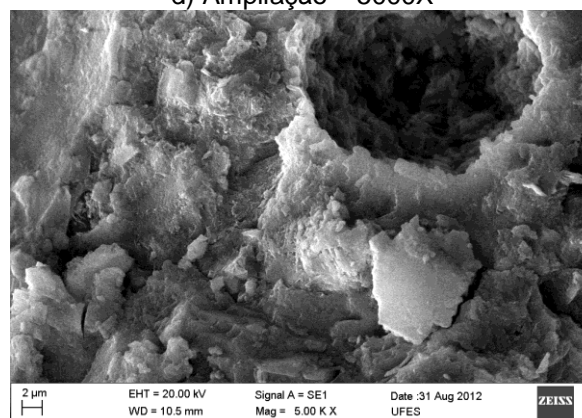
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 5000X

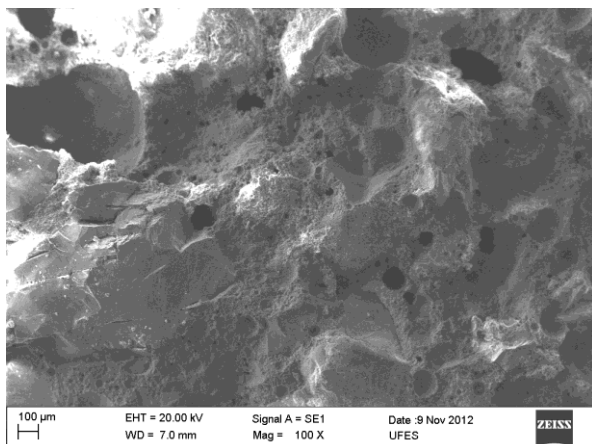


e) Ampliação – 10000X

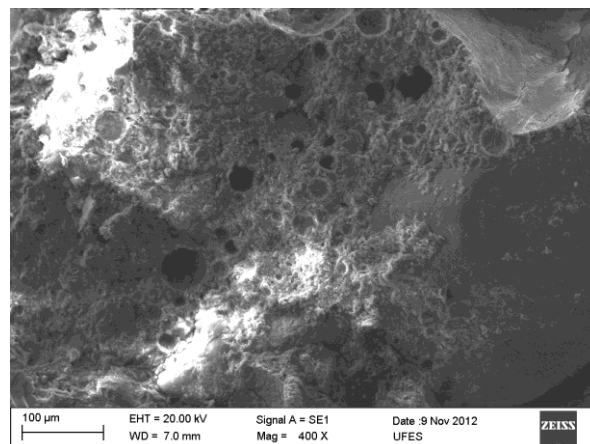


f) Ampliação – 10000X

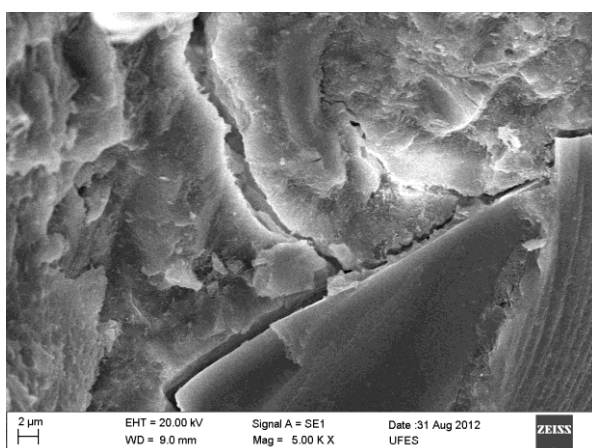
Figura B.1.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 63 dias



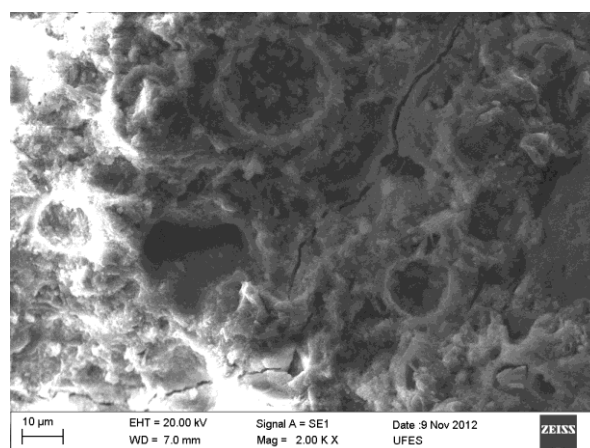
a) Ampliação – 100X



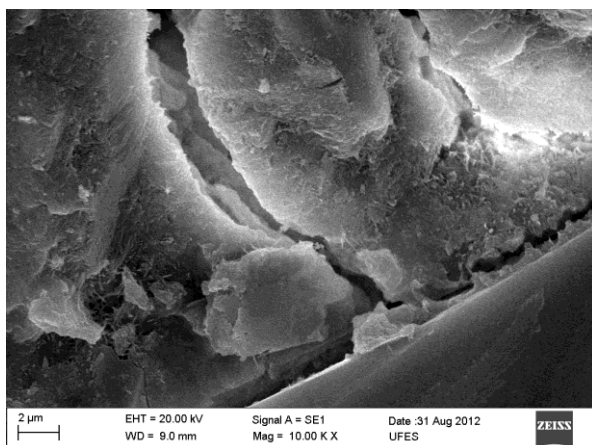
b) Ampliação – 400X



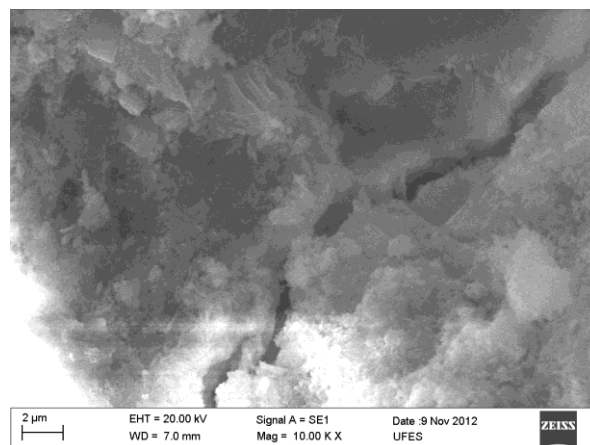
c) Ampliação – 5000X



d) Ampliação – 2000X

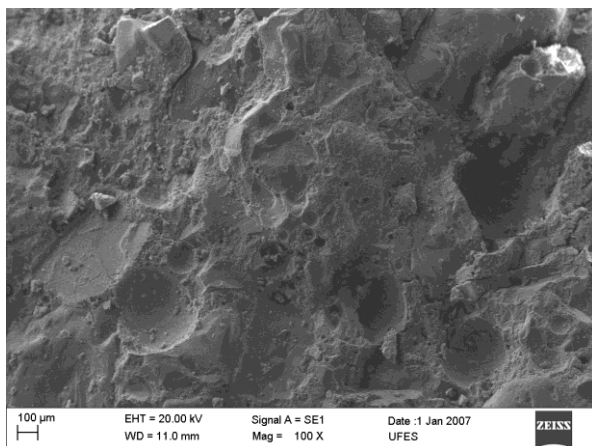


e) Ampliação – 10000X

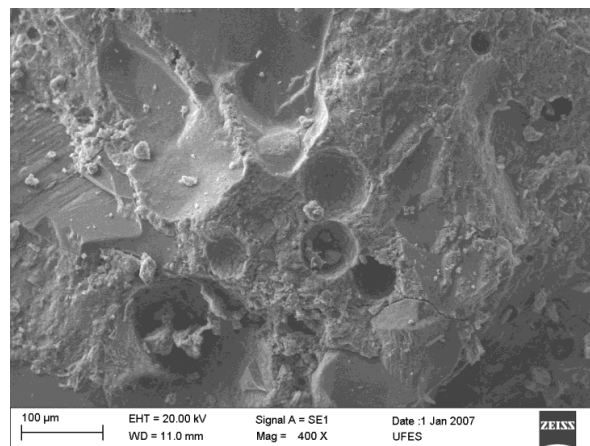


f) Ampliação – 10000X

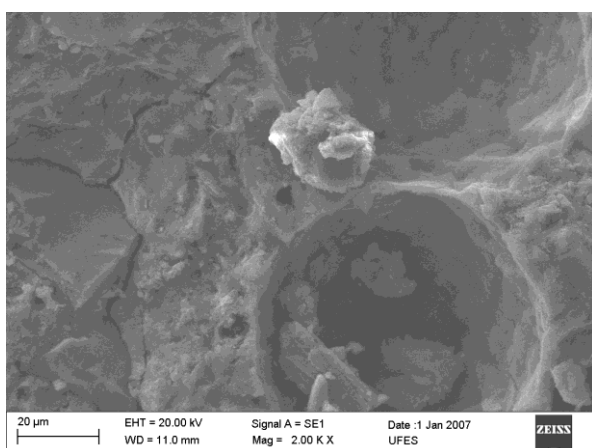
Figura B.1.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa referência aos 270 dias



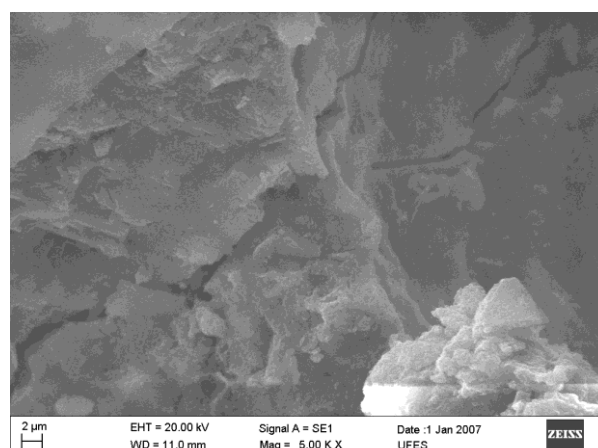
a) Ampliação – 100X



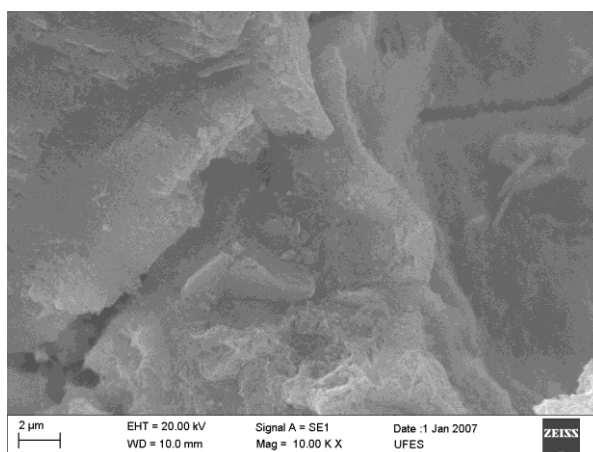
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X



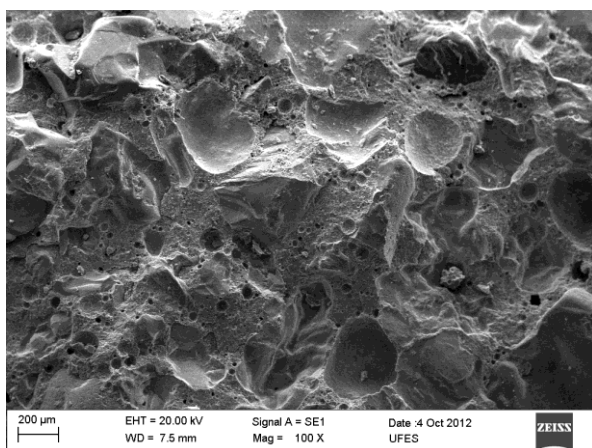
d) Ampliação – 5000X



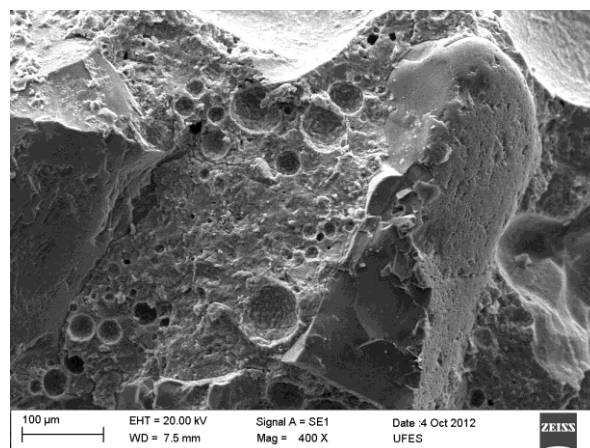
e) Ampliação – 10000X

B.2 Micrografias da argamassa com traço ARE 7

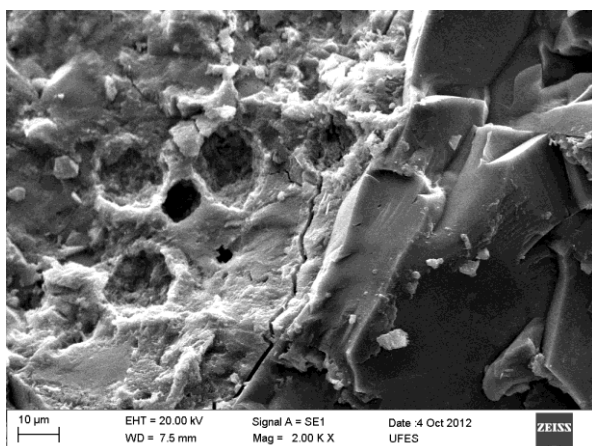
Figura B.2.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 7 aos 28 dias



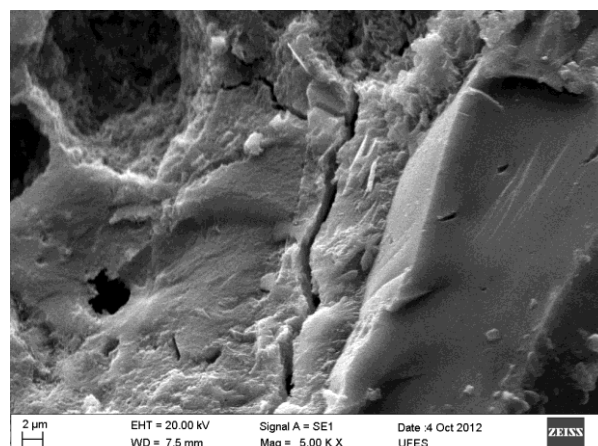
a) Ampliação – 100X



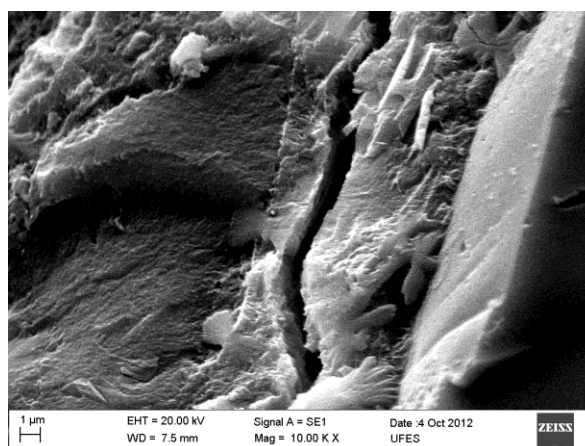
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X

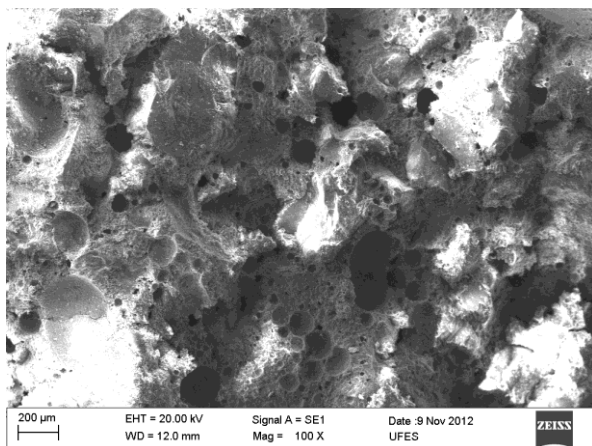


d) Ampliação – 5000X

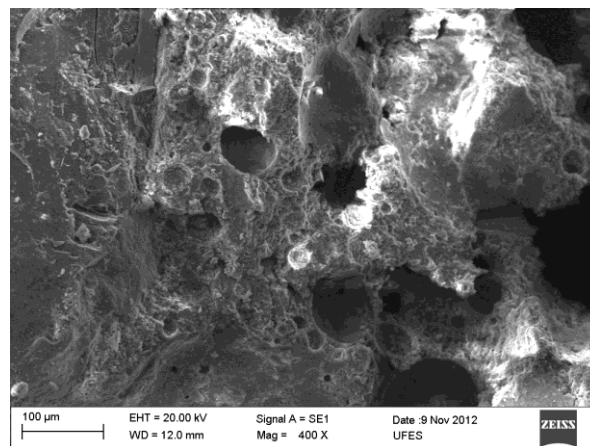


e) Ampliação – 10000X

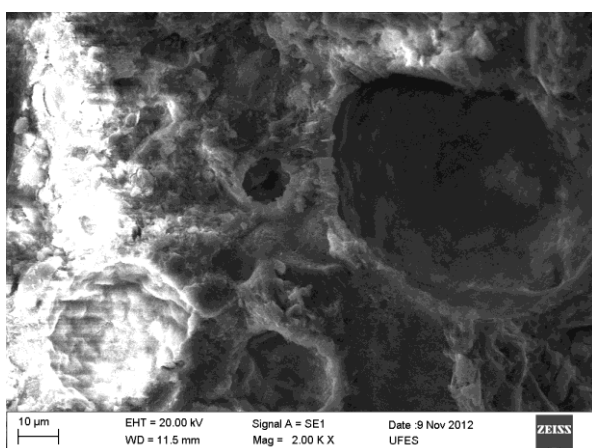
Figura B.2.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 7 aos 63 dias



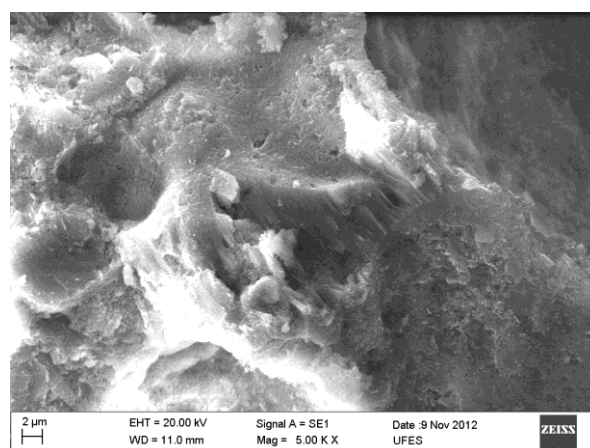
a) Ampliação – 100X



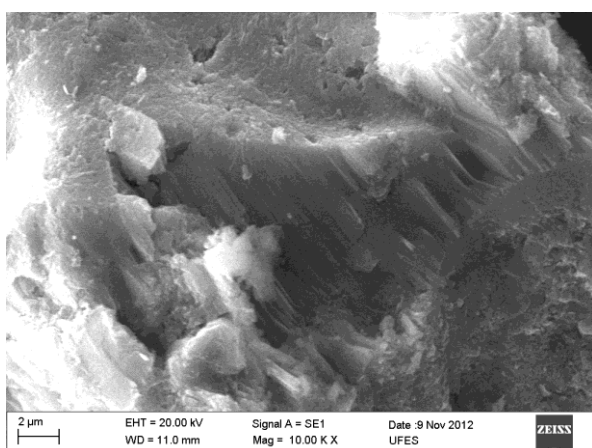
b) Ampliação – 400X



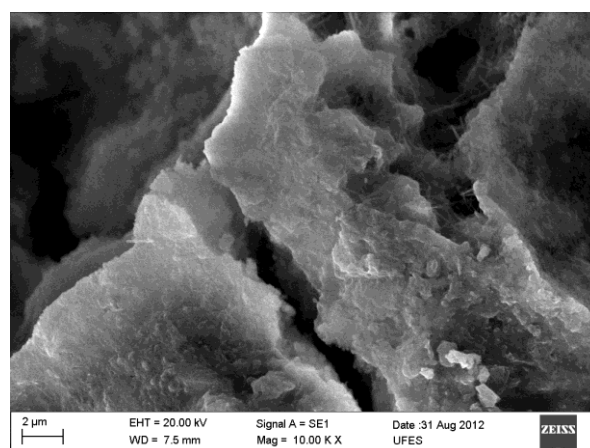
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 5000X

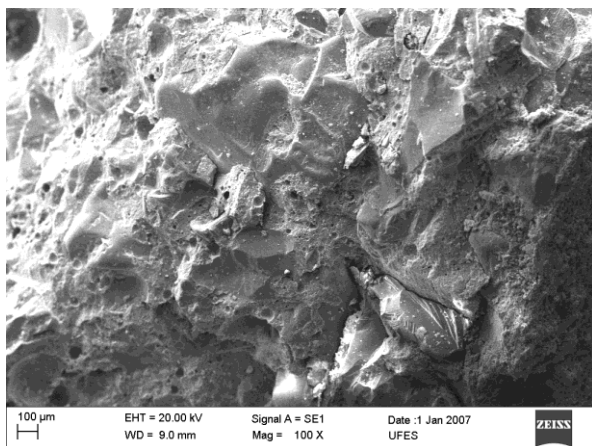


e) Ampliação – 10000X

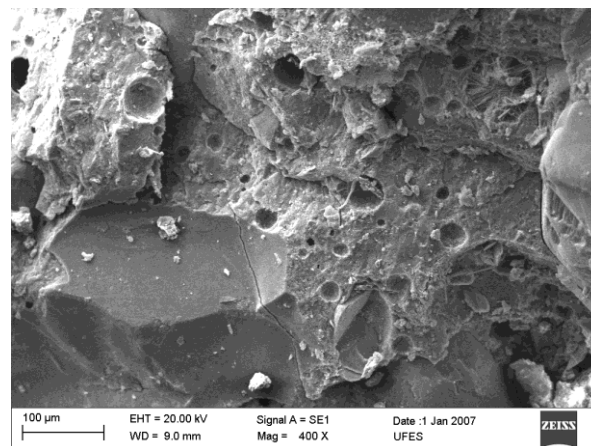


f) Ampliação – 10000X

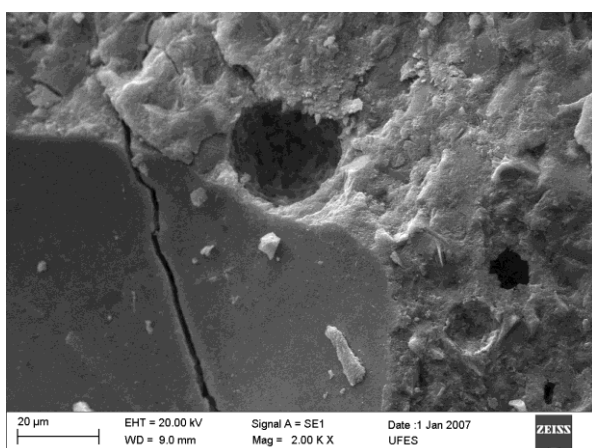
Figura B.2.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 7 aos 270 dias



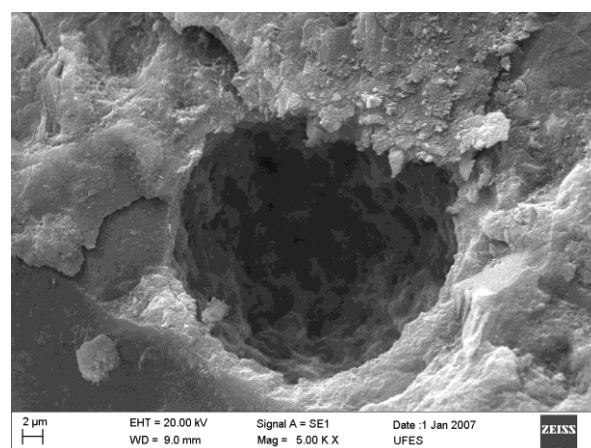
a) Ampliação – 100X



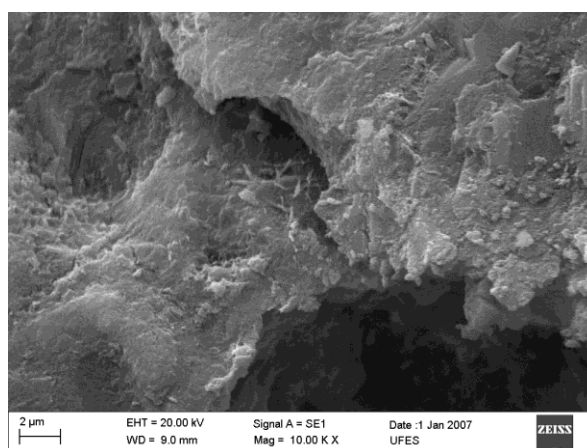
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X



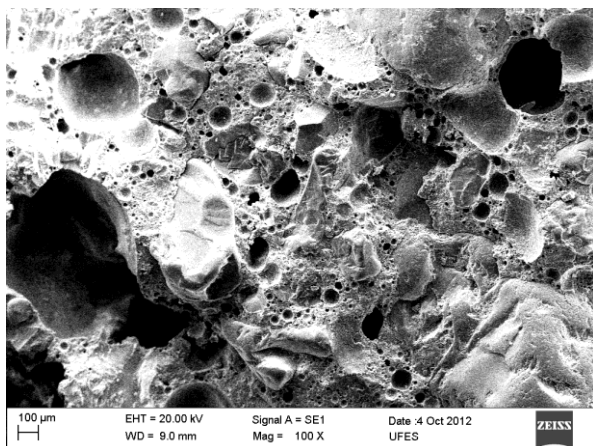
d) Ampliação – 5000X



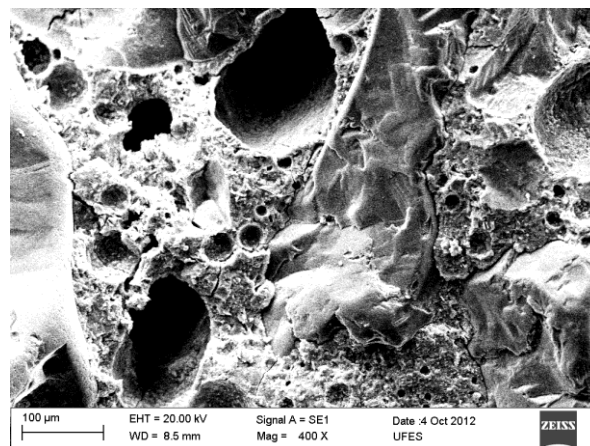
e) Ampliação – 10000X

B.3 Micrografias da argamassa com traço ARE 13

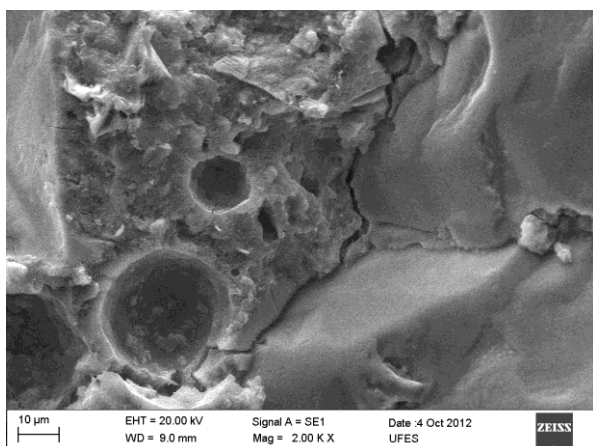
Figura B.3.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 13 aos 28 dias



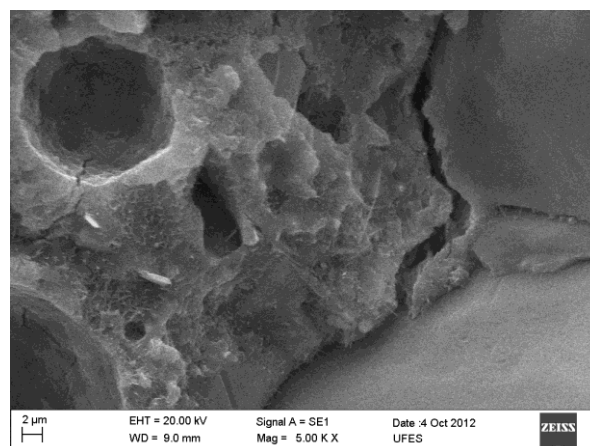
a) Ampliação – 100X



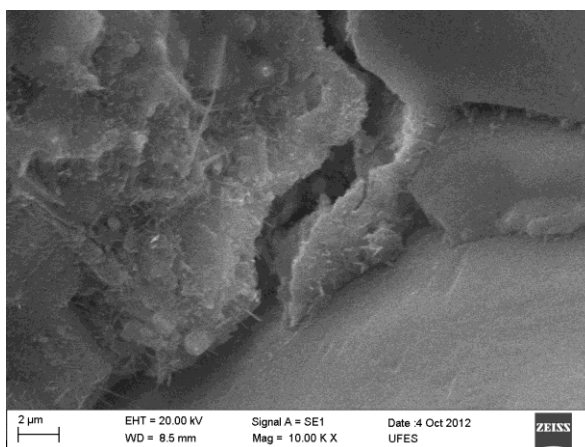
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X

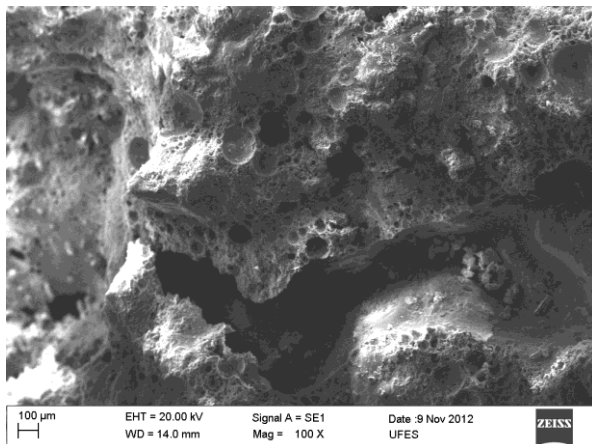


d) Ampliação – 5000X

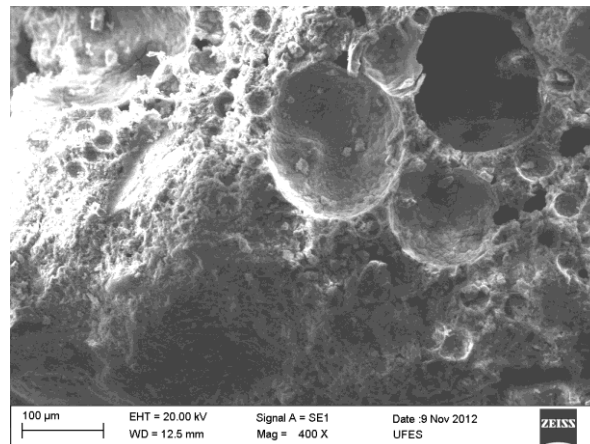


e) Ampliação – 10000X

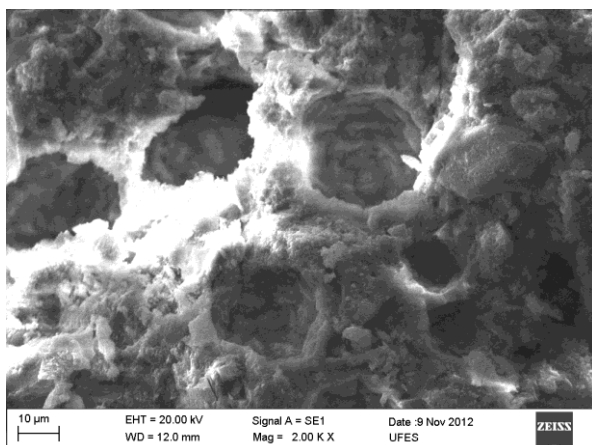
Figura B.3.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 13 aos 63 dias



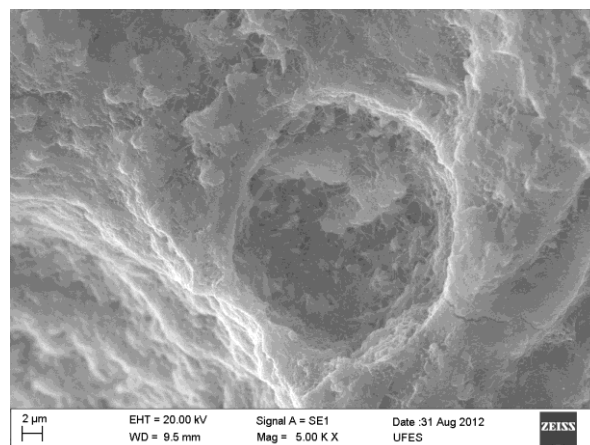
a) Ampliação – 100X



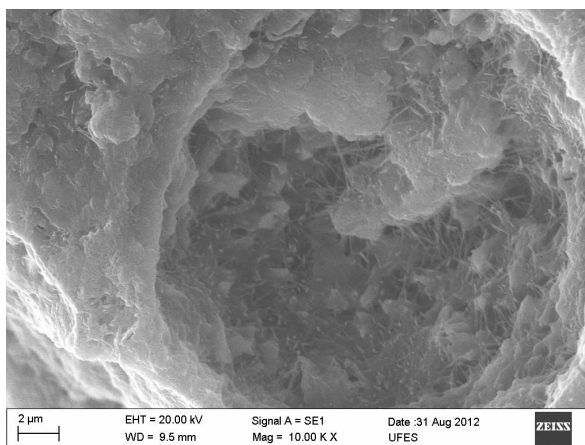
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X

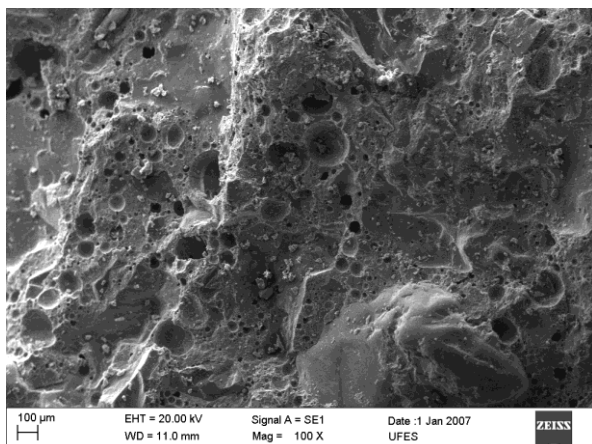


d) Ampliação – 5000X

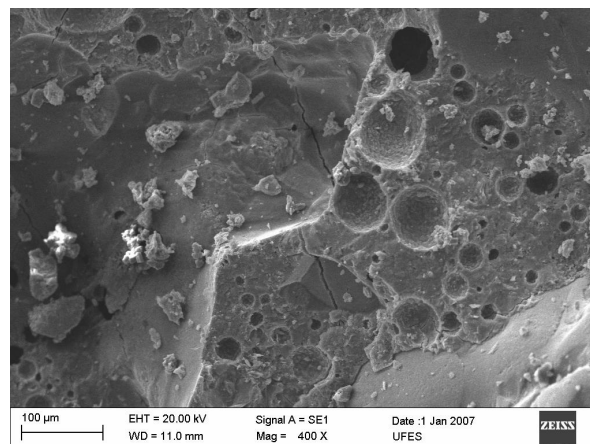


e) Ampliação – 10000X

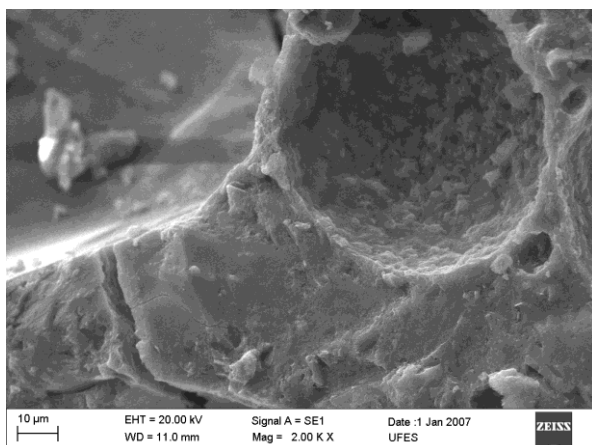
Figura B.3.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 13 aos 270 dias



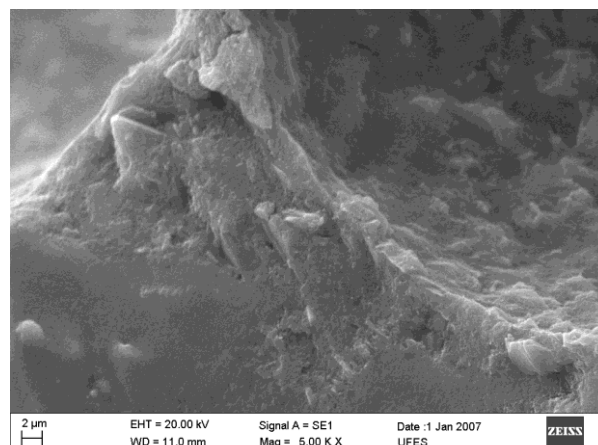
a) Ampliação – 100X



b) Ampliação – 400X



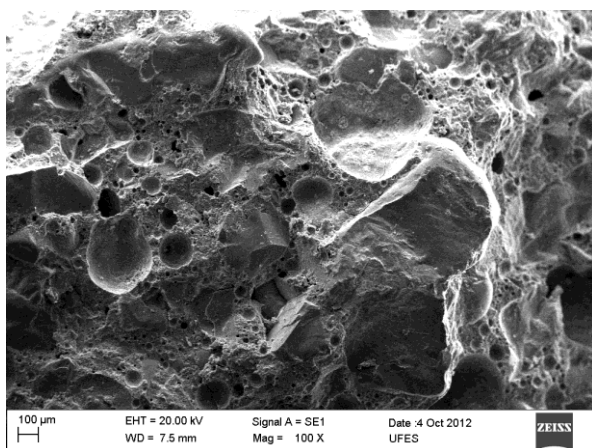
c) Ampliação – 2000X



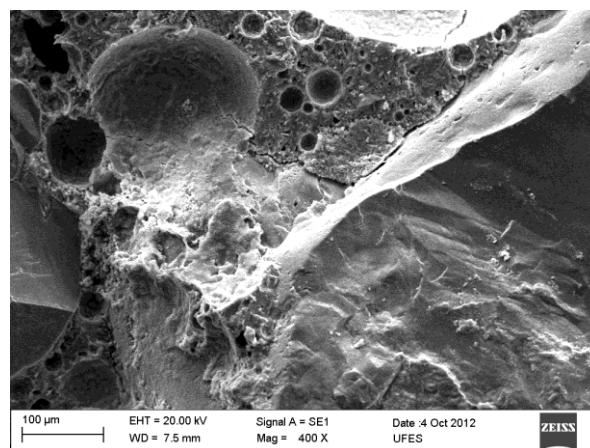
d) Ampliação – 5000X

B.4 Micrografias da argamassa com traço ARE 20

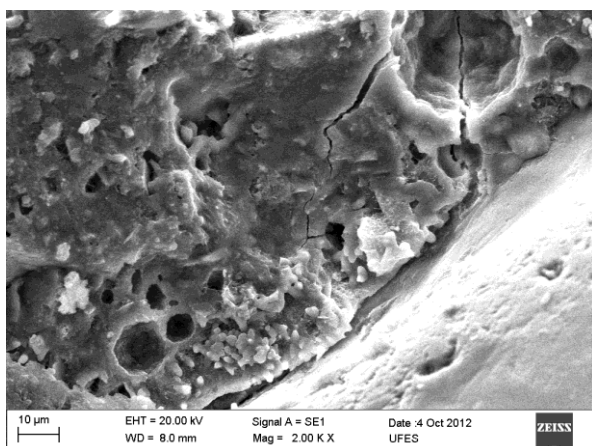
Figura B.4.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 20 aos 28 dias



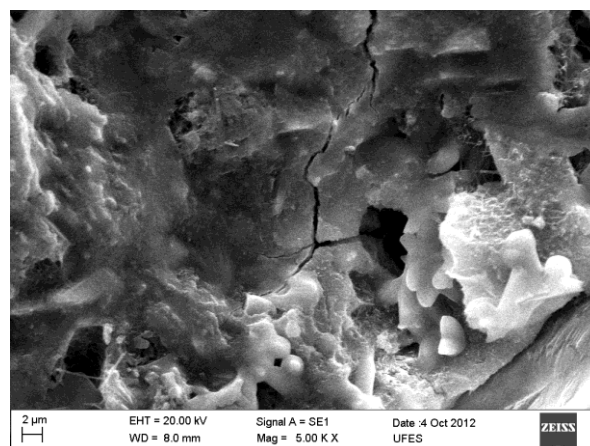
a) Ampliação – 100X



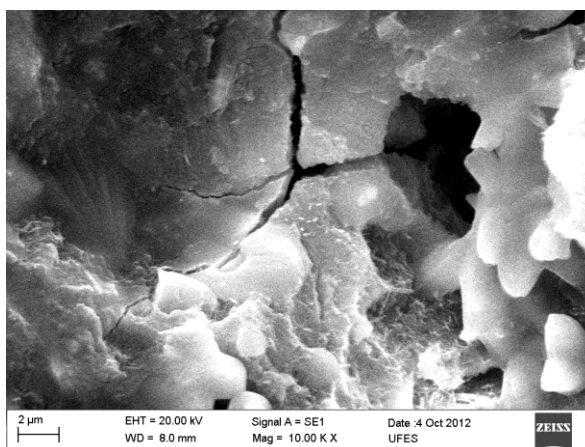
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X

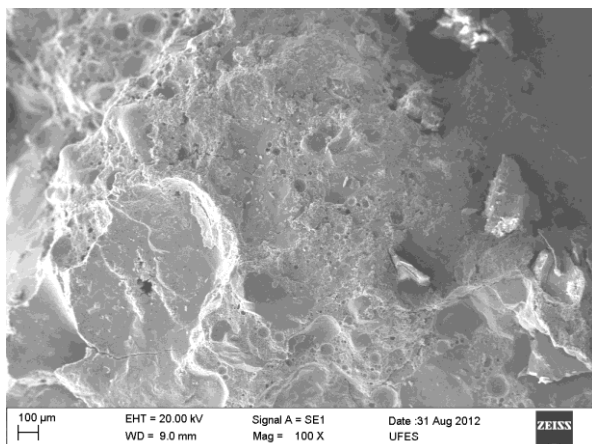


d) Ampliação – 5000X

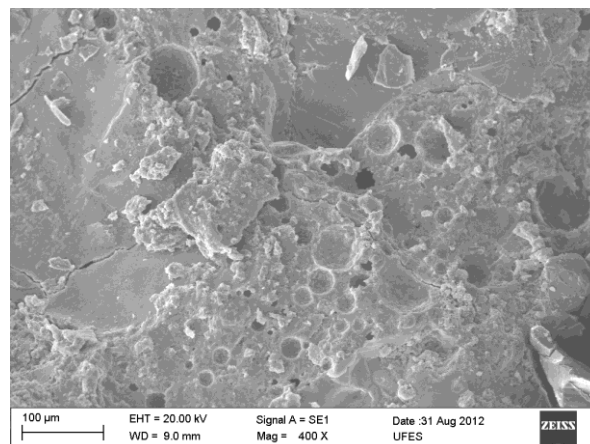


e) Ampliação – 10000X

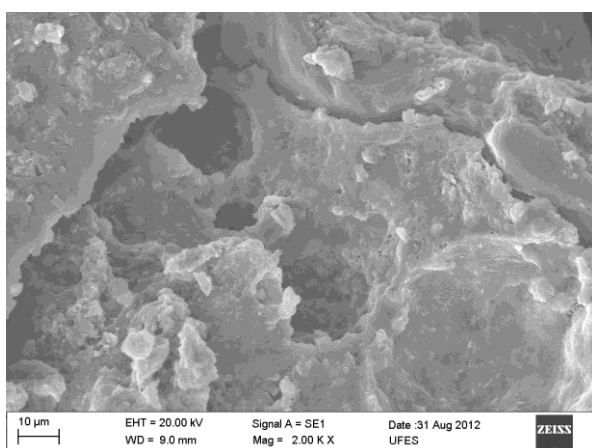
Figura B.4.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 20 aos 63 dias



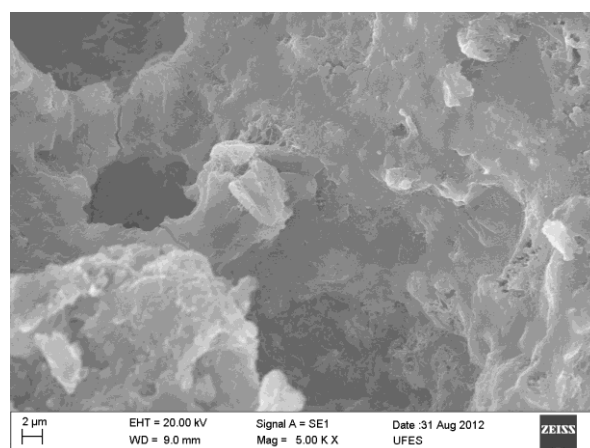
a) Ampliação – 100X



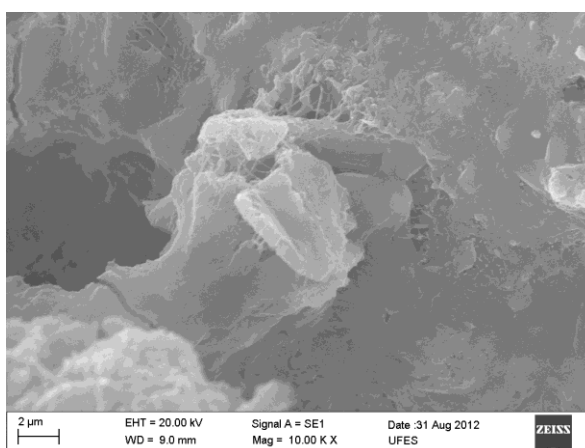
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X

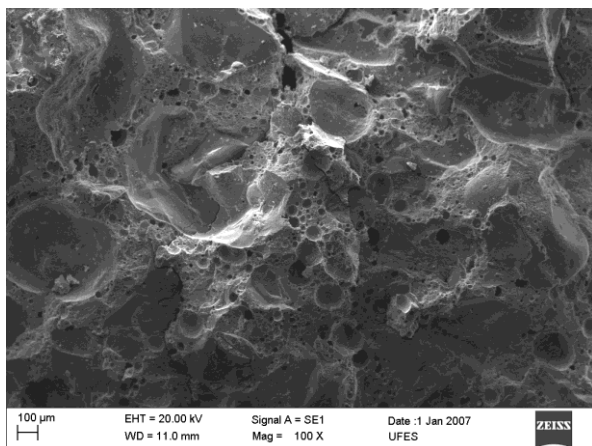


d) Ampliação – 5000X

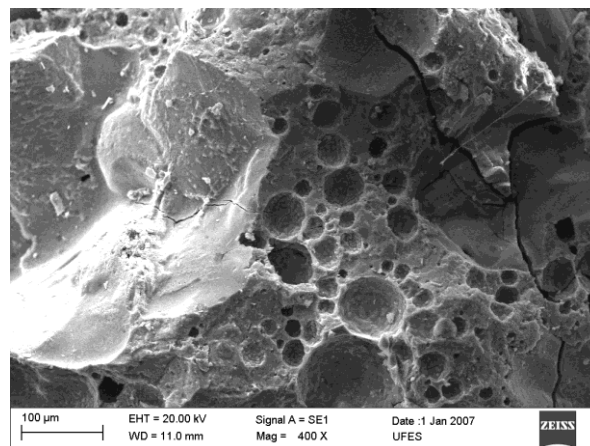


e) Ampliação – 10000X

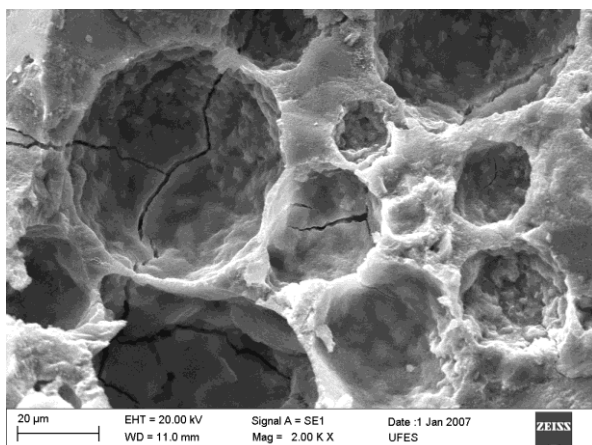
Figura B.4.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 20 aos 270 dias



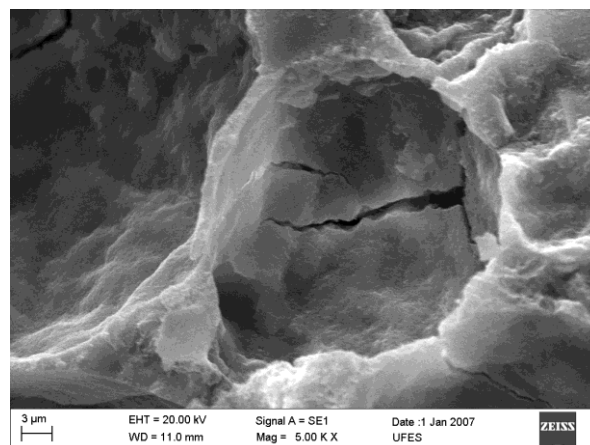
a) Ampliação – 100X



b) Ampliação – 400X



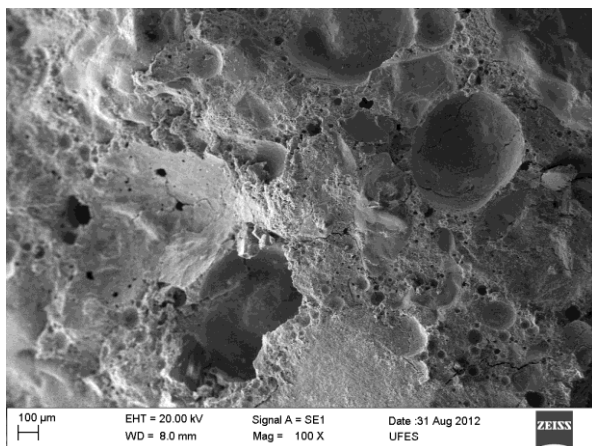
c) Ampliação – 2000X



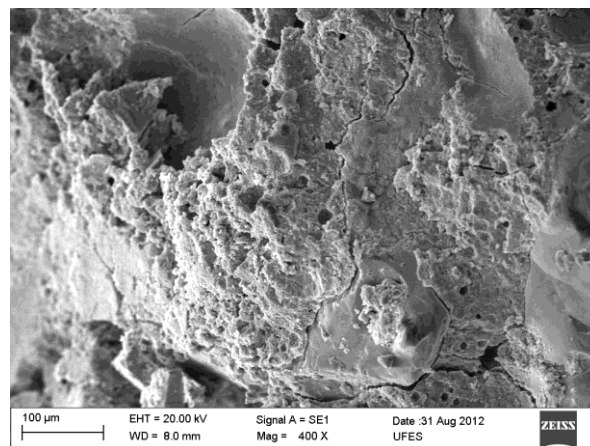
d) Ampliação – 5000X

B.5 Micrografias da argamassa com traço ARE 26

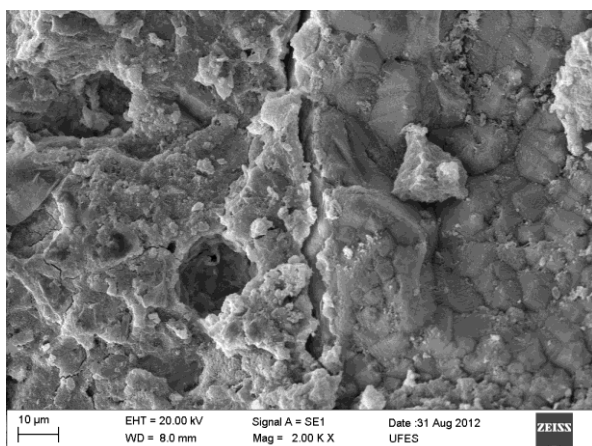
Figura B.5.1 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 26 aos 28 dias



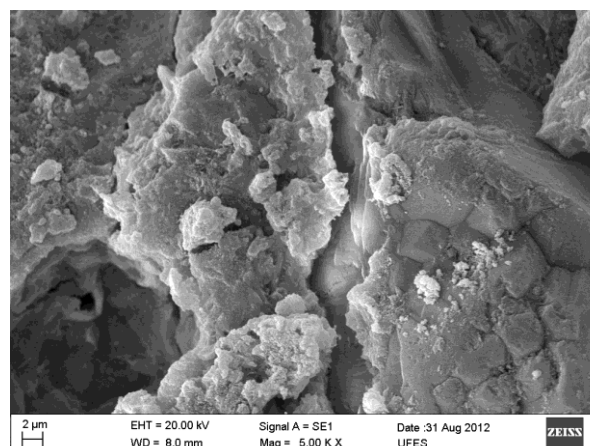
a) Ampliação – 100X



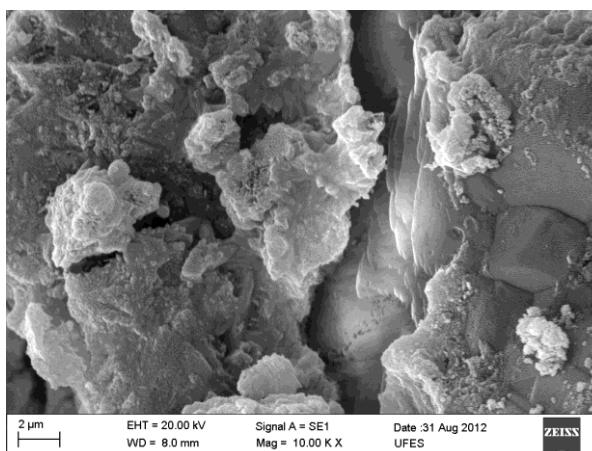
b) Ampliação – 400X



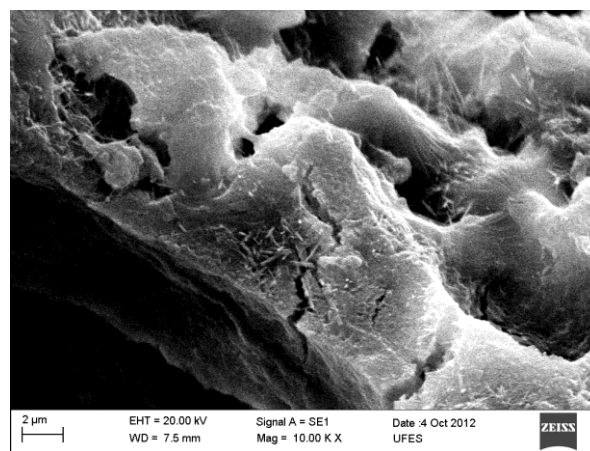
c) Ampliação – 2000X



d) Ampliação – 5000X

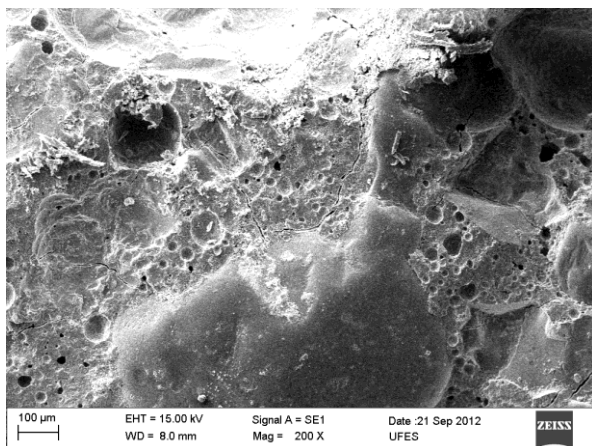


e) Ampliação – 10000X

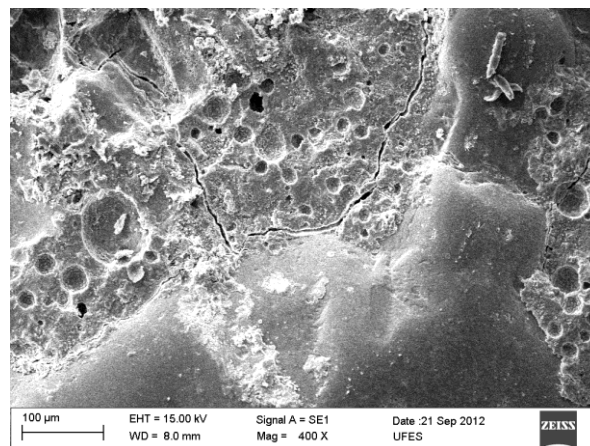


f) Ampliação – 10000X

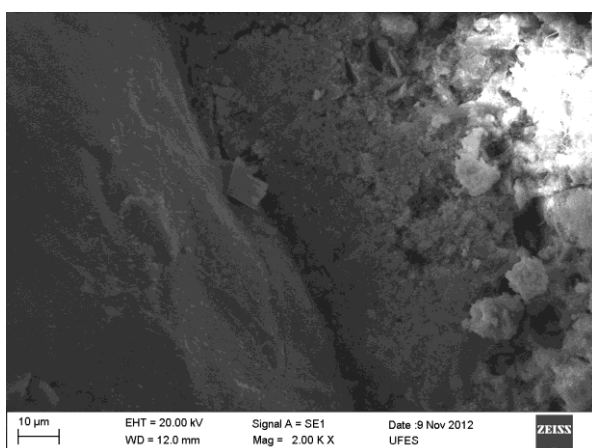
Figura B.5.2 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 26 aos 63 dias



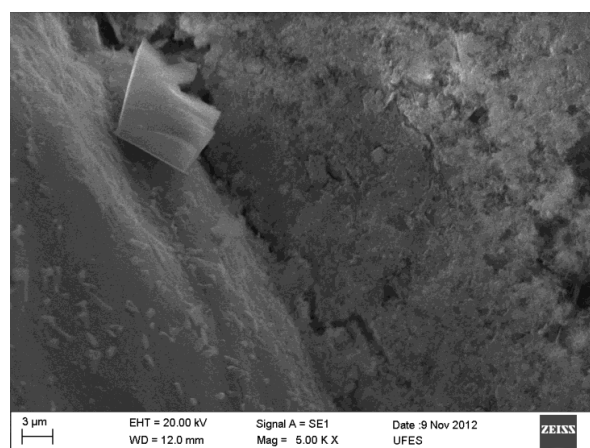
a) Ampliação – 100X



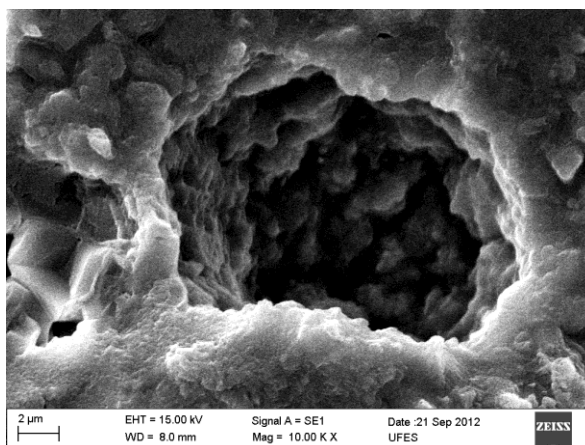
b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 2000X

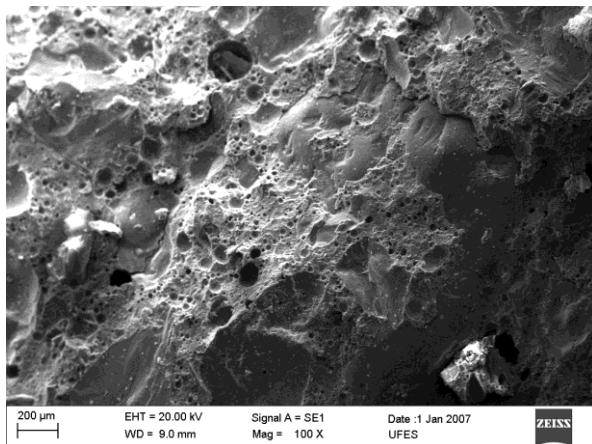


d) Ampliação – 5000X

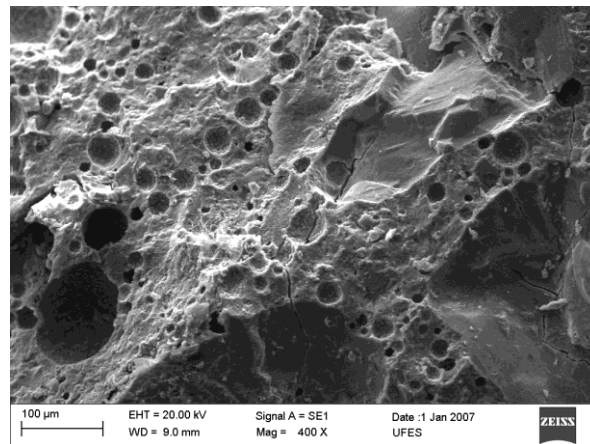


e) Ampliação – 10000X

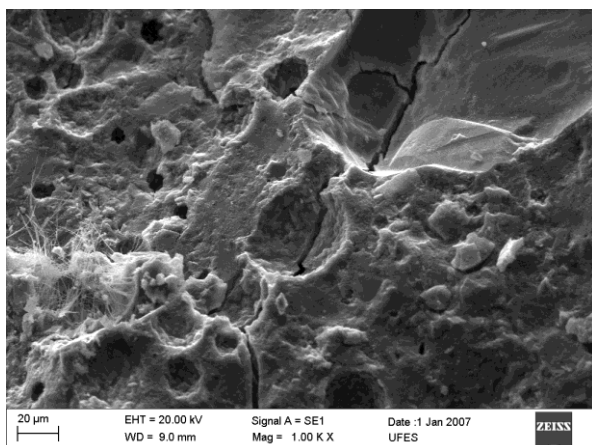
Figura B.5.3 - Imagens obtidas por MEV da argamassa com traço ARE 26 aos 270 dias



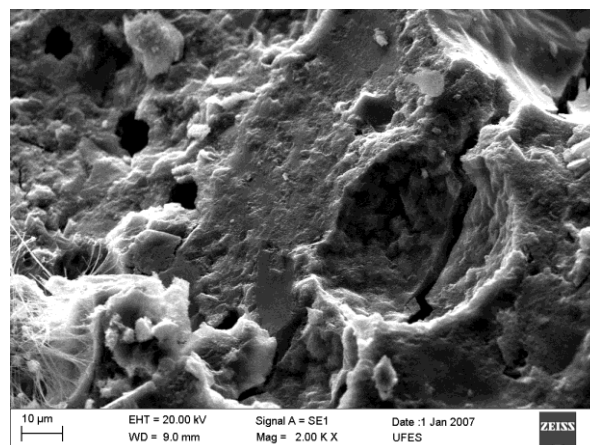
a) Ampliação – 100X



b) Ampliação – 400X



c) Ampliação – 1000X



d) Ampliação – 2000X