

**INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO NAS PROPRIEDADES DE UMA
ARGAMASSA COLANTE**

DIOGO PEREIRA DOS SANTOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JUNHO - 2016

INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO NAS PROPRIEDADES DE UMA ARGAMASSA COLANTE

DIOGO PEREIRA DOS SANTOS

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil”.

Orientador: Prof. Dylmar Penteado Dias

Co-orientador: Prof. Jonas Alexandre

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE - UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
JUNHO - 2016**

FICHA CATALOGRÁFICA
Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

133/2016

Santos, Diogo Pereira dos

Influência de resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante / Diogo Pereira dos Santos. – Campos dos Goytacazes, 2016.

135 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2016.

Orientador: Dylmar Penteadó Dias.

Coorientador: Jonas Alexandre.

Área de concentração: Estruturas.

Bibliografia: f. 91-97.

1. ADITIVO MINERAL 2. ARGAMASSA COLANTE 3. AGREGADO 4. CIMENTO 5. RESÍDUOS DE VIDRO 6. SUBSTITUIÇÃO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 624.15335

AGRADECIMENTOS

A Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para suportar e superar as dificuldades, mostrar os caminhos e me suprir em todas as minhas necessidades;

À minha querida esposa, Mariana, por ser tão importante na minha vida. Sempre ao meu lado, pondo-me para cima e me fazendo acreditar que posso mais do que imagino. Devido a seu companheirismo, amizade, paciência, compreensão, apoio, alegria e amor, este trabalho pôde ser concretizado. Obrigado por ter feito do meu sonho o nosso sonho!

Aos meus pais, Jovani e Angélica, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade e me deram força para crescer. Isso só me fortaleceu e me fez encarar as dificuldades apenas como um processo de crescimento e amadurecimento. Obrigado pelo amor incondicional!

Aos meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos, especialmente a Jaíne, o Márcio e a Patricia, que tornaram mais leve meu trabalho. Obrigado por dividir comigo as angústias e alegrias e ouvirem minhas bobagens. Foi bom poder contar com vocês!

Ao meu orientador, Professor Dr. Dymar, por aceitar-me como orientado e pelo seu apoio e amizade, além de sua competência e especial atenção nas sugestões, fatores fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador Professor Dr. Jonas, por ter me conduzido no mestrado, querendo que eu aproveitasse cada segundo dentro do mestrado para absorver algum tipo de conhecimento.

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil pelo apoio técnico excepcional, em especial o Milton, pela disponibilidade e boa vontade, que o fez muitas vezes um verdadeiro amigo. Serei sempre grato a ele!

Ao professor Dr. Gustavo que se fez presente neste trabalho e nunca me negou ajuda quando precisei. Agradeço muito pelo tempo que se dedicou em sanar minhas dúvidas.

À graduanda de Engenharia Civil Carla Bozzi, que chegou nos 45 minutos do segundo tempo, mas fez toda a diferença na pesquisa. Nunca esquecerei da noite que se dedicou em me ajudar.

Finalmente, gostaria de agradecer à UENF e ao LECIV por abrirem as portas para que eu pudesse concretizar este projeto, minha DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. Proporcionaram-me mais que a busca de conhecimento técnico e científico, mas uma LIÇÃO DE VIDA.

Ninguém vence sozinho...

OBRIGADO A TODOS!

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xv
RESUMO.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo geral.....	2
1.1.2 Objetivo específico.....	3
1.2 Justificativa.....	3
1.3 Estrutura do trabalho.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 O vidro no Brasil.....	5
2.2 O material vidro.....	8
2.3 Resíduo utilizado neste estudo.....	10
2.4 Aplicação do resíduo de vidro na construção civil.....	13
2.4.1 Considerações gerais.....	13
2.4.2 Aplicação do resíduo de vidro em matrizes cimentícias.....	15
2.4.2.1 Reação álcali-sílica.....	15
2.4.2.2 Influência da granulometria do resíduo de vidro nas reações álcali-sílica.....	17
2.4.2.3 Estudos realizados com o aproveitamento do resíduo em matrizes cimentícias.....	19
2.4.2.4 Influência do resíduo de vidros nas propriedades das misturas cimentícias no estado fresco.....	24
2.4.2.5 Influência do resíduo de vidro na aderência da argamassa.....	25
2.3.2.6 Influência da aplicação de resíduo de vidro na microestrutura das matrizes cimentícias.....	26
2.5 Argamassa colante.....	28
2.5.1 Breve histórico.....	28
2.5.2 Comportamento reológico das argamassas colantes.....	30
2.5.3 Substrato padrão.....	33
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	35
3.1 Planejamento dos experimentos.....	35

3.2	Apresentação geral do experimento.....	36
3.3	Materiais.....	39
3.3.1	Cimento Portland CPV AR.....	39
3.3.2	Aditivos.....	41
3.3.3	Agregados.....	41
3.3.4	Resíduo do pó de vidro.....	42
3.4	Métodos.....	49
3.4.1	Estudo de dosagem e preparo das argamassas.....	50
3.4.2	Produção do substrato padrão.....	52
3.4.3	Ensaio das argamassas no estado fresco.....	53
3.4.3.1	Consistência por espalhamento e massa volumétrica da argamassa.....	53
3.4.3.2	Retenção de água.....	55
3.4.3.3	Teor de ar incorporado.....	56
3.4.3.4	<i>Squeeze flow</i>	56
3.4.3.5	Deslizamento.....	56
3.4.4	Ensaio no estado endurecido.....	58
3.4.4.1	Determinação do tempo em aberto.....	59
3.4.4.2	Determinação da resistência de aderência à tração.....	60
3.4.4.3	Análise estatística.....	62
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	64
4.1	Ensaio realizado nas argamassas em estado fresco.....	64
4.1.1	Densidade de massa e teor de ar incorporado.....	64
4.1.2	Retenção de água.....	67
4.1.3	Deslizamento.....	71
4.1.4	<i>Squeeze flow</i>	71
4.2	Ensaio realizado nas argamassas em estado endurecido.....	74
4.2.1	Resistência de aderência à tração.....	74
4.2.2	Resistência de aderência à tração do tempo em aberto.....	83
5.	CONCLUSÕES.....	87
5.1	Conclusão geral.....	87
5.2	Sugestões para estudos futuros	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

ANEXOS		98
ANEXOS I	Planilha de ensaio de teor de ar incorporado (%).....	98
ANEXOS II	Análise de variância (ANOVA) – teor de ar incorporado.....	99
ANEXOS III	Planilha de ensaio de retenção de água (%).....	100
ANEXOS IV	Análise de variância (ANOVA) – retenção de água.....	101
ANEXOS V	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura normal.....	102
ANEXOS VI	Panilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura normal.....	103
ANEXOS VII	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura normal.....	104
ANEXOS VIII	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura normal.....	105
ANEXOS IX	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura em estufa.....	106
ANEXOS X	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura em estufa.....	107
ANEXOS XI	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura em estufa.....	108
ANEXOS XII	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura em estufa.....	109
ANEXOS XIII	Panilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura submersa.....	110
ANEXOS XIV	Panilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura submersa.....	111
ANEXOS XV	Panilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura submersa.....	112
ANEXOS XVI	Panilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - cura submersa.....	113
ANEXOS XVII	Análise de variância (ANOVA) – resistência de aderência à tração - cura normal.....	114
ANEXOS XVIII	Análise de variância (ANOVA) – resistência de aderência à tração - cura em estufa.....	115

ANEXOS XIX	Análise de variância (ANOVA) – resistência de aderência à tração - cura submersa.....	116
ANEXOS XX	Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa) - tempo em aberto (15 minutos).....	117
ANEXOS XXI	Análise de variância (ANOVA) – resistência de aderência à tração - tempo em aberto (15 minutos).....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Produção de vidro no Brasil entre os anos 2007 e 2011 (Associação Brasileira das Indústria Automáticas de vidro – ABIVIDRO, 2012).....	6
Figura 2.2	Índice de reciclagem do vidro no país	7
Figura 2.3	Estrutura química do vidro (Callister, 1997).....	8
Figura 2.4	a) Vidro boro silicato; (b) Vidro sodo-cálcico; (c) Vidro ao chumbo, (adaptado da ABIVIDRO, 2010).....	9
Figura 2.5	Maquinário para diferentes tipos de lapidação de chapas de vidro. (a) processo manual de lapidação, para confecção de peças circulares, totalmente moldadas pelo funcionário operador do maquinário; (b) equipamento para cortes, furos e lapidação.....	10
Figura 2.6	Reservatório onde a água proveniente do processo de lapidação é armazenada antes do tratamento (Viminas, 2013).....	11
Figura 2.7	Resíduo proveniente do silo de decantação depositado no tanque agitador, para evitar ressecamento da lama (Viminas, 2013).....	12
Figura 2.8	Resíduo após a passagem pelo filtro prensa (Viminas, 2013).....	12
Figura 2.9	Fluxograma do processo completo de obtenção do resíduo de lapidação de vidro sodo-cálcico utilizado neste estudo. (adaptado de ANTÔNIO, 2011).....	13
Figura 2.10	Gel alcalino formado devido a RAS (adaptado de Munhoz, 2007, baseado em Collins, 2007).....	15
Figura 2.11	- Reação álcali-sílica reativa. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo-filoneano em gel (Silva, 1992).....	16
Figura 2.12	Curvas de expansão em barras de argamassa contendo partículas de vidro com diferentes granulometrias (Shayan & Xu, 2004).....	17
Figura 2.13	Microscopias eletrônicas de varredura das partículas de cimento e resíduo de vidro. (a) Cimento - ampliação 1000x; (b) Resíduo de vidro - ampliação 2000x(Matoss e Souza-Coutinho, 2012).....	18
Figura 2.14	Reações sucessivas de partículas de vidro grosso e fino (adaptado de Idir <i>et al.</i> , 2010).....	21
Figura 2.15	Resistência à compressão relativa aos 7 e 28 dias (Ozkan e Yuksel 2008).....	23

Figura 2.16	Microscopias eletrônicas de varredura dos concretos de traço REF (a) e S20 (b), ampliadas em 5000x (Antônio, 2012).....	26
Figura 2.17	Microscopias eletrônicas de varredura de argamassas referência (Ref) e argamassa com incorporação de resíduo de vidro (C-70), ampliadas em 5000x (Corinaldesi <i>et al.</i> , 2005).....	27
Figura 2.18	Perfil típico de carga <i>versus</i> deslocamento de um ensaio de <i>Squeeze Flow</i> (Cardoso, 2009).....	32
Figura 3.1	Organograma das fases de caracterização dos materiais princípios do programa experimental.....	38
Figura 3.2	Distribuição granulométrica do CPV ARI (Votorantim - 2015).....	39
Figura 3.3	Equipamento utilizado para destorroar o resíduo.....	43
Figura 3.4	Resíduo seco e destorroado.....	43
Figura 3.5	Resíduo no moinho de bolas	44
Figura 3.6	Resíduo moído	44
Figura 3.7	Distribuição granulométrica do resíduo de vidro.....	44
Figura 3.8	Micrografia obtida por MEV das partículas de resíduo com ampliação de 1000x.....	46
Figura 3.9	Difratograma de raios X do resíduo.....	46
Figura 3.10	Resultados individuais de resistência à compressão para verificação do índice de atividade pozolânica.....	48
Figura 3.11	Misturador mecânico.....	52
Figura 3.12	Molde metálico com tela de aço.....	53
Figura 3.13	Preparo para o ensaio de densidade de massa	54
Figura 3.14	Ensaio de densidade de massa.....	54
Figura 3.15	Ensaio de retenção de água.....	55
Figura 3.16	Garantindo a verticalidade do substrato padrão	57
Figura 3.17	Posicionamento das placas cerâmicas no substrato padrão.....	58
Figura 3.18	Após 20 minutos de ensaio.....	58
Figura 3.19	Tempo em aberto nas argamassas durante 15 minutos	59
Figura 3.20	Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas cerâmicas em cura normal	60
Figura 3.21	Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas cerâmicas em cura submersa em água.....	61

Figura 3.22	Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas cerâmicas em cura em estufa (70°C).....	61
Figura 3.23	Substrato padrão com a argamassa aplicada com pastilhas metálicas coladas e o equipamento utilizado na execução do ensaio de arranchamento.....	62
Figura 3.23	Tipos de ruptura no ensaio de determinação de resistência de aderência à tração de revestimento (adaptado de Cincotto <i>et al.</i> ,1995).....	62
Figura 4.1	Efeito do resíduo substituindo a areia.....	67
Figura 4.2	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia.....	70
Figura 4.3	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento.....	70
Figura 4.4	Resultados de deslizamento.....	71
Figura 4.5	Curvas carga <i>versos</i> deslocamento obtidas no ensaio <i>squeeze flow</i> das argamassas com percentual de resíduo na areia.....	72
Figura 4.6	Curvas carga <i>versos</i> deslocamento obtidas no ensaio <i>squeeze flow</i> das argamassas com percentual de resíduo na areia.....	72
Figura 4.7	Curvas carga <i>versos</i> deslocamento obtidas no ensaio <i>squeeze flow</i> das argamassas com percentual de resíduo na areia e 10% de resíduo no cimento.....	73
Figura 4.8	Curvas carga <i>versos</i> deslocamento obtidas no ensaio <i>squeeze flow</i> das argamassas com percentual de resíduo na areia e 15% de resíduo no cimento.....	73
Figura 4.9	Curvas carga <i>versos</i> deslocamento obtidas no ensaio <i>squeeze flow</i> das argamassas com percentual de resíduo na areia e 20% de resíduo no cimento.....	73
Figura 4.10	Resistência de aderência à tração.....	75
Figura 4.11	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração.....	77
Figura 4.12	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração.....	78
Figura 4.13	Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a	79

	areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração.....	
Figura 4.14	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa.....	80
Figura 4.15	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa.....	80
Figura 4.16	Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa.....	81
Figura 4.17	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração sob cura submersa.....	82
Figura 4.18	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento sobre a resistência de aderência à tração sob cura submersa.....	83
Figura 4.19	Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração sob cura submersa.....	83
Figura 4.20	Resistência de aderência à tração (tempo em aberto - 15 minutos)...	84
Figura 4.21	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração em tempo em aberto.....	85
Figura 4.22	Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento sobre a resistência de aderência à tração em tempo em aberto.....	86
Figura 4.23	Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração em o tempo em aberto.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Caracterização química do vidro (Viminas,2013).....	8
Tabela 2.2	Propriedades fundamentais para argamassas colantes.....	29
Tabela 2.3	Propriedades opcionais para argamassas colante.....	30
Tabela 2.4	Reologia para argamassas.....	33
Tabela 3.1	Variáveis envolvidas na pesquisa.....	36
Tabela 3.2	Caracterização do cimento CP V ARI.....	40
Tabela 3.3	Distribuição granulométrica da areia.....	42
Tabela 3.4	Caracterização da areia.....	42
Tabela 3.5	Caracterização do resíduo de vidro.....	45
Tabela 3.6	Comparação dos requisitos químicos mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).....	47
Tabela 3.7	Resultados do ensaio do índice de pozolanicidade.....	49
Tabela 3.8	Resultado da condutividade elétrica do resíduo de vidro.....	49
Tabela 3.9	Tabela de classificação da pozolanicidade do material, proposta por Lúxan et al.(1989).....	49
Tabela 3.10	Resumo das argamassas.....	50
Tabela 3.11	Quantidade de materiais (em massa).....	51
Tabela 4.1	Resultados do ensaio de massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco.....	65
Tabela 4.2	ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre o teor de ar incorporado.....	65
Tabela 4.3	Resultados do ensaio de retenção de água no estado fresco.....	67
Tabela 4.4	ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a retenção de água...	68
Tabela 4.5	Quadro de análise para o teste de Tukey.....	69
Tabela 4.6	Médias e Medidas.....	70
Tabela 4.7	ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração sob cura normal.....	75
Tabela 4.8	Quadro de análise para o teste de Tukey, sob cura normal.....	78
Tabela 4.9	Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura normal.....	78
Tabela 4.10	ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa.....	79

Tabela 4.11	Quadro de análise para o teste de Tukey, sob cura em estufa.....	81
Tabela 4.12	Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura em estufa.....	81
Tabela 4.13	ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração sob cura submersa.....	82
Tabela 4.14	Quadro de análise para o teste de Tukey, sob cura submersa.....	84
Tabela 4.15	Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura submersa.....	84
Tabela 4.16	ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração - tempo em aberto.....	85
Tabela 4.17	Quadro de análise para o teste de Tukey.....	87
Tabela 4.18	Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura submersa.....	88

RESUMO

A procura pelo reaproveitamento de resíduos gerados nos centros urbanos, com a intenção de preservar os recursos naturais, tem se mostrado constante, tanto no âmbito de evitar a exploração desses recursos, como a deposição dos resíduos no meio ambiente. A utilização de resíduos de vidro como aditivo mineral, finamente moído, em substituição parcial de cimento e de agregados é uma direção promissora para reciclagem, pois estudos sobre a incorporação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias indicam a utilização deste resíduo como substituto de agregados ou aglomerantes. Esse trabalho teve como objetivo de analisar a influência de resíduos provenientes da estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro em argamassa colante, como substituição parcial de cimento e do agregado miúdo. O vidro em pó foi empregado em porcentagens de substituição ao cimento Portland de 10, 15 e 20% em massa e, em outro momento, em substituição ao agregado miúdo de 10, 15 e 20% em massa, bem como a interação desses percentuais. As argamassas produzidas foram analisadas a partir de propriedades no estado fresco, retenção de água, teor de ar incorporado, deslizamento, *squeeze flow*, e densidade de massa; e no estado endurecido, resistência de aderência à tração e tempo em aberto. A argamassa com 10% 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. O teor de ar incorporado das argamassas tende a aumentar com o aumento do teor de substituição, sendo que a argamassa com substituição de cimento e areia em 10 e 20%, respectivamente, apresentou o maior valor de teor de ar incorporado. Estes resultados indicam o potencial de utilização do resíduo de vidro como substituto parcial do cimento em argamassas colantes, merecendo ainda, outras pesquisas, principalmente no que concerne aos aspectos de resistência e durabilidade.

Palavras-chave: aditivo mineral, argamassa colante, agregado, cimento, resíduo de vidro, substituição.

ABSTRACT

The search for the reuse of waste generated in urban centers, with the intention of preserving natural resources, has been constant, both in the context of preventing the exploitation of these resources, as the emplacement of waste on the environment. The use of waste glass as a mineral additive, finely ground in partial replacement of cement and aggregate is a promising direction for recycling, since studies on glass residue incorporation into cementitious matrices indicate the use of waste as aggregate replacement or binders. This work aims to study the influence of residues from the treatment plant effluent glass cutting process in adhesive mortar, as partial replacement of cement and fine aggregate. The glass powder is used in the cement replacement percentage Portland 10, 15 and 20% by mass and, at another time, instead of fine aggregate 10, 15 and 20% by mass and interaction these percentages. The mortars produced were analyzed from properties in the fresh state, water retention, slip embedded air content, squeeze flow and bulk density and in the hardened state, adhesive strength to tensile and open time. The mortar with 10% replacement by cement glass residue showed the best results as to mechanical performance, with values close to those found for the reference mortar. The entrained air content of the mortar tends to increase with increasing the substitution level, once the mortar with cement and sand 10 substitution and 20%, respectively, showed the highest entrained air content value. These results indicate the potential use of glass waste as a partial substitute for cement mortar adhesive, meriting further, other research, especially with regard to aspects of resistance and durability.

Keywords: mineral additive, adhesive mortar, aggregate, cement, glass residue, substitution.

1. INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento tecnológico aumentou significativamente a produção de bens industrializados e o volume de recursos minerais explorados. Associado a essa grande expansão produtiva houve um enorme aumento na quantidade de resíduos produzidos, fazendo com que milhões de toneladas de resíduos sejam geradas a cada dia em todo mundo. Esses resíduos são definidos como produtos não utilizados pela atividade humana, social e industrial. Dentre todos os tipos de resíduos, os resíduos sólidos (RS) merecem destaque, uma vez que representam substancial parcela dentre todos gerados e, quando mal gerenciados, tornam-se um problema sanitário, ambiental e social.

As principais fontes de geração de resíduos são a agricultura, o setor da construção civil, a indústria e as zonas urbanas. Os resíduos agrícolas ocupam o primeiro lugar em termos de quantidade, e os resíduos industriais são os mais significativos em termos de impacto ambiental, por apresentar maior dificuldade de manuseamento, pela complexidade e potencial toxicidade. Representam grandes perdas econômicas e acarretam impactos negativos de natureza ambiental e social, vez que sua reintrodução no processo produtivo é muitas vezes difícil ou mesmo impossível.

Nos últimos anos vários estudos foram efetuados no âmbito da substituição parcial de materiais convencionais por resíduos de diversas indústrias. Tal fato tem alertado as indústrias para o desenvolvimento de alternativas tecnológicas, ao nível do processamento e até mesmo do consumo de matérias primas, a fim de poupar recursos para as gerações futuras e preservar o ambiente. Em alguns casos, surgiu a oportunidade de desenvolver novos materiais e produtos, com características físicas e mecânicas semelhantes ou até mesmo superiores quando comparadas aos materiais e produtos convencionais (Pereira, 2006).

Segundo John (2000), através do aprimoramento da tecnologia, é possível reciclar diferentes resíduos e subprodutos oriundos de outras indústrias e inseri-los em substituição ao uso dos recursos naturais no desenvolvimento de materiais construtivos, de forma a otimizar recursos

empregados e reduzir a geração de resíduos a um mínimo. O pesquisador cita alguns benefícios obtidos na reciclagem, entre eles: redução do consumo de recursos naturais não renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados; redução do consumo de energia durante o processo de produção; e redução da poluição ao emitir menor quantidade de gás carbônico a partir da diminuição do uso do cimento Portland.

Nem todos os resíduos podem ser reciclados de forma convencional, por exemplo, no processo de fabricação de artefatos de vidro, durante a lapidação obtém-se um resíduo sólido constituído basicamente de vidro em pó. Esse resíduo, diferentemente dos cacos, acarreta entre outros problemas a presença de bolhas de ar no produto final. A reciclagem desse resíduo é uma preocupação das indústrias de vidro atualmente, visando preservar o meio ambiente e o acúmulo de resíduos que demandam espaço para serem estocados.

Pesquisas que abordam a aplicação do vidro moído em pó como pozolana começaram por volta de 1970, mas a maioria dos trabalhos nesta área é relativamente recente, e tem sido incentivada como resultado da acumulação contínua de resíduos de vidro e suas conseqüentes questões ambientais (Shayan e Xu, 2006). Tem merecido destaque também pesquisas envolvendo a substituição de agregados naturais, como a areia de rio, por agregados reciclados, em concreto e argamassas.

A investigação sobre o uso de vidro moído como substituto parcial ao agregado data de muitas décadas, porém o uso do vidro como agregado nem sempre teve bons resultados devido ao tamanho dos grãos, pois os álcalis do cimento Portland e a sílica do vidro reagem na presença de umidade, resultando em uma reação química denominada álcali-sílica, que causa a redução da resistência mecânica e expansão excessiva (Terro, 2006).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta pesquisa consiste em avaliar a influência da substituição parcial do cimento Portland e do agregado miúdo natural (areia

quartzosa de rio) pelo resíduo de vidro proveniente da estação de tratamento de efluentes (ETE) instalada na empresa Viminás, município da Serra, região metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos da pesquisa, podem ser relacionados:

- avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício, do agregado e da dupla substituição material cimentício/agregado por resíduo de vidro em argamassas no estado fresco através dos ensaios de massa específica, retenção de água, teor de ar incorporado, comparando-as com as amostras sem substituição;
- avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício, do agregado e da dupla substituição material cimentício/agregado por resíduo de vidro, em diferentes tipos de cura, sobre algumas propriedades mecânicas como a resistência à aderência a tração comparando-as com as amostras sem substituição;
- avaliar o efeito dos diferentes percentuais de substituição do material cimentício, do agregado e da dupla substituição material cimentício/agregado por resíduo de vidro, através do ensaio de tempo em aberto.

1.2 Justificativas

A utilização de resíduos de vidro gera alguns benefícios:

- elimina custos de depósito dos resíduos em aterros sanitários, que tendem a aumentar;
- preservação do meio ambiente por evitar a extração de grandes quantidades de matéria prima todos os anos;
- aumento da vida útil dos aterros sanitários, contribuindo com a preservação das áreas livres;
- economia de quantidade significativa de energia e redução da emissão de dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO), além de outros poluentes emitidos a partir da produção do clínquer;

- disponibilidade de muitos usos para produtos à base de vidro reciclado, sem comprometimento do uso ou qualidade.

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

1.3 Estrutura do trabalho

A presente dissertação de mestrado encontra-se estruturada em cinco capítulos, além da referências bibliográficas. A seguir é apresentada uma breve descrição a respeito do conteúdo tratado em cada capítulo.

O Capítulo 1 é introdutivo e apresenta os objetivos, além de justificar o tema abordado e a estrutura do trabalho produzido através desta.

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, o resíduo do vidro laminado 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 colantes.

O Capítulo 3 descreve a metodologia do programa experimental, as variáveis envolvidas na pesquisa, os materiais empregados e sua caracterização, incluindo o método de preparo do resíduo para torná-lo apto à aplicação em argamassas colantes. Além das dosagens e dos teores de substituição do cimento e/ou do agregado miúdo, constam também neste capítulo o método de moldagem dos corpos de prova, dos ensaios nos estados frescos e endurecido e o método estatístico utilizado na análise dos resultados.

No Capítulo 4 são apresentados, analisados estatisticamente e discutidos os resultados dos ensaios descritos no programa experimental.

O Capítulo 5 consta as principais conclusões, além de sugestões para trabalhos futuros nessa área.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão sobre o vidro no Brasil e o resíduo de vidro, enfatizando sua utilização de resíduos em sistemas cimentícios, bem como conceitos de termos importantes que frequentemente aparecerão neste trabalho.

2.1 O vidro no Brasil

A fabricação do vidro brasileiro teve seu início após a Revolução de 30, liderada por Getúlio Vargas, e foi intensificada pela conjuntura mundial da época, centralizada nos problemas deflagrados pela 2ª Guerra Mundial (COMLURB, 2009).

Inicialmente o vidro não era considerado um insumo essencial para o país, muito pelo contrário, era classificado como um artigo supérfluo, com taxas de até 40% na importação; mesmo sem uma produção interna suficiente, o mercado possuía grande interesse em explorar tal negócio, visto que pelo seu potencial de consumo, vislumbrava um futuro promissor. Quando houve então a intensificação da 2ª Guerra Mundial, a conjuntura do mercado tornou-se favorável para a produção do vidro nacional, visto que a Europa, principal exportadora de vidro para o Brasil, não conseguia manter sua produção e de certa forma passou a ser importadora de vários produtos, não só do vidro (COMLURB, 2009).

Foi fundada em 1942 a Companhia Vidreira Nacional Covibra, instalada em São Gonçalo, na época distrito de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, cujo objetivo principal era aproveitar a disponibilidade de areias de boa qualidade no local para fornecer vidro plano para a Capital Federal, na época a cidade do Rio de Janeiro, e toda a baixada fluminense (COMLURB, 2009).

Quase ao final da guerra, em São Paulo, mais especificamente Barra Funda, os proprietários da Vidraria Santa Marina criaram a Companhia Paulista de Vidro Plano, CPVP, com o objetivo inicial de produzir garrafas; a nova fábrica produziria vidro para o mercado da capital paulista, para o interior do estado e regiões vizinhas (COMLURB, 2009).

No início da década de 50 foi acertada a criação das Indústrias Reunidas Vidrobrás Ltda., resultado da fusão entre a Covibra e a CPVP, almejando a produção de vidro para todo o mercado nacional.

Atualmente, no Brasil, a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro (ABIVIDRO,2012) é o órgão que congrega as empresas que se dedicam à indústria automática de vidro no país, com o objetivo de estimular o contínuo aprimoramento da técnica dessa atividade industrial, promovendo seu uso e suas qualidades.

A produção de vidros tem aumentado no Brasil ao longo dos últimos anos, como se pode observar na Figura 2.1. Ocorreu, no entanto, uma sensível queda na produção dos vidros domésticos no ano de 2008, diferente do vidro plano. Todavia, entre 2007 e 2011, a produção cresceu 27%.

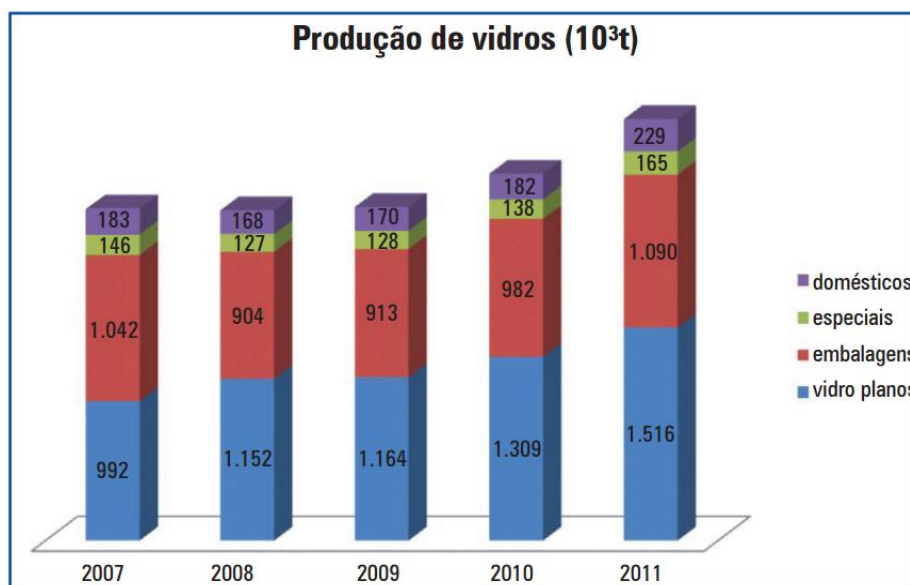


Figura 0.1- Produção de vidro no Brasil entre os anos 2007 e 2011 (Associação Brasileira das Indústria Automáticas de vidro – ABIVIDRO, 2012).

A produção está concentrada na Região Sudeste, com cinco plantas, sendo quatro no Estado de São Paulo, uma no Estado do Rio de Janeiro e uma na Região Sul, localizada em Santa Catarina. Em 2013, entrou em operação mais duas empresas que passaram a atuar nesse mercado de vidros planos, a AGC, multinacional japonesa instalada em Guaratinguetá, Estado de São Paulo, a única entre as maiores do mundo que ainda não atuava no Brasil, e a Companhia Brasileira de Vidros Planos – CBVP de capital 100% nacional

pertencente ao grupo Cornélio Brennand, a primeira a se instalar na região Nordeste, no Estado de Pernambuco.

Apesar do aumento da demanda de vidros planos nos últimos anos, seu consumo *per capita* no Brasil pode ser considerado baixo, quando comparado com a média mundial, Em 2009, enquanto o consumo mundial *per capita* foi de 0,89 metros quadrados, no Brasil ficou em apenas 0,61 metros quadrados. Esse dado indica que o mercado brasileiro ainda apresenta grande potencial de crescimento.

Segundo a ABIVIDRO (2009), existem atualmente mais de duzentos fabricantes de vidro no Brasil que atendem tanto ao mercado interno quanto ao mercado externo.

Pesquisas realizadas pelo CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem) em 2009 mostram que o índice de reciclagem do vidro no país está em torno de 45%. Sendo que, 40% originários da indústria de embalagens, 40% do mercado difuso, 10% do “canal frio” (bares, restaurantes, hotéis *etc.*) e 10% do refugo da indústria.

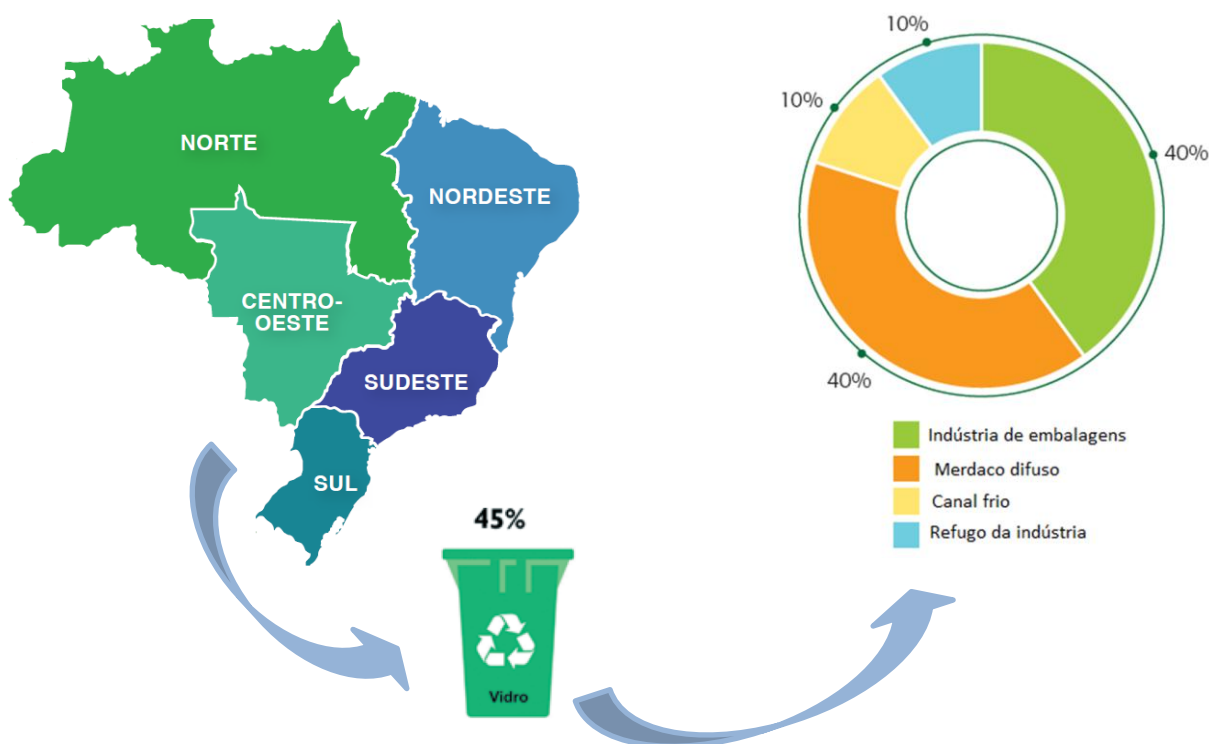


Figura 0.2 - Índice de reciclagem do vidro no país (adaptado de CEMPRE, 2009).

2.2 O material vidro

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

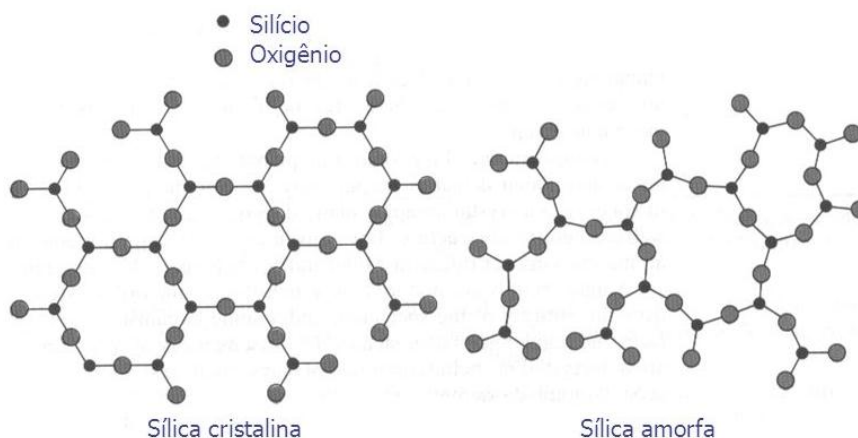


Figura 0.3 - Estrutura química do vidro (Callister, 1997).

O vidro é uma mistura de areia, barrilha, calcário, alumina e aditivos que formam uma massa semilíquida. É obtido pela fusão, em torno de 1.500°C, de dióxido de silício (SiO_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e carbonato de cálcio (CaCO_3). Como pode ser observado na Tabela 2.1, os vidros possuem como constituinte principal a sílica (SiO_2).

Tabela 0.1 - Caracterização química do vidro (Viminas,2013).

Óxidos	%
SiO₂	72,40
MgO	4,00
K₂O	0,30
Fe₂O₃	0,11
TiO₂	0,02
SO₂	0,20
MgO	4,00
K₂O	0,30
Fe₂O₃	0,11

American Society for Testing and Materials (ASTM) define o vidro como um produto inorgânico de fusão que foi arrefecido em uma condição rígida sem cristalizar. O vidro pode ser incolor ou colorido. É transparente, mas pode ser opaco ou translúcido, e apresenta uma estrutura não cristalina, isto é, a sua estrutura é amorfa (ASTM, 2009).

A variação da composição resulta em uma enorme variedade de tipos de vidro, famílias ou grupos, e uma variedade de propriedades correspondentes. As propriedades do vidro dependem sempre da sua composição, permitindo assim um conjunto de propriedades para atender a uma aplicação específica.

De acordo com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro, a ABIVIDRO (2010), o vidro pode ser classificado em três tipos (Figura 2.4), de acordo com a composição química que apresentam:

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



Figura 0.4 - (a) Vidro boro - silicato; (b) vidro sodo-cálcico; (c) vidro ao chumbo (adaptado da ABIVIDRO, 2010).

Quanto às suas características físicas, de acordo com Sichieri *et al.*, o vidro sodo-cálcico deve possuir:

- massa específica = $2500 \pm 50 \text{ kg/m}^3$;
- dureza = $\pm 6,5 \text{ Mohs}$;

- módulo de elasticidade = 75.000 ± 5.000 MPa;
- tensão de ruptura à flexão = 40 ± 5 MPa;
- coeficiente de Poisson = 0,22.

Neste estudo, foi utilizado resíduos de vidro com elevados teores de vidro sodo-cálcico, uma vez que, foram provenientes do processo de lapidação de chapas de vidros planos da Viminas, indústria beneficiadora de vidros planos, utilizados principalmente na construção civil.

2.3 Resíduo utilizado neste estudo

O processo gerador do resíduo inicia-se com a lapidação (Figura 2.5) das chapas de vidro sodo-cálcico (vidros planos), mecanismo que apara as extremidades, evitando o acabamento cortante das chapas. A água é indispensável no processo de lapidação e no polimento do vidro, pois visa o atrito e a temperatura das peças durante o processo, no intuito de prolongar a durabilidade e evitar que as chapas se quebrem pelo atrito excessivo. A empresa fornecedora do resíduo utilizado neste estudo reutiliza mais de 95% da água no processo. Sua reutilização torna-se importante para a indústria, tanto financeiramente como ecologicamente. O reaproveitamento máximo da água é feito através de uma estação vertical de tratamento de efluentes, dotada de filtro prensa em seu processo final de decantação e clarificação da água.



Figura 0.5 - Maquinário para diferentes tipos de lapidação de chapas de vidro. (a) processo manual de lapidação, para confecção de peças circulares, totalmente moldadas pelo funcionário operador do maquinário; (b) equipamento para cortes, furos e lapidação.

O processo para reutilização da água ocorre da seguinte maneira: a água utilizada é despejada em canais que circulam por todo o galpão de manufatura dos vidros. Esta água, juntamente com o resíduo do vidro, é

transportada por estes canais para tanques de bombas submersas que bombeiam a água até um reservatório, que se encontra na porção externa do galpão (Figura 2.6). Esta água com resíduo é bombeada para um primeiro silo, de capacidade igual a 106 m³, onde são adicionados produtos químicos para o processo de decantação. Um dos produtos químicos utilizados para esse processo trata-se de um clarificante alcalino de aspecto incolor, levemente amarelado, muito solúvel em água, etanol e solventes polares, que apresenta teores mínimos de 12% de óxido de alumínio. O produto utilizado é um floculante catiônico com a função de aglomerar as partículas, promovendo a separação dos flocos de vidro através de um processo de decantação rápida e floculação do lodo, deixando-o de fácil remoção. É utilizado em forma de pó granulado, de cor branca, muito solúvel em água, porém sua solubilidade é limitada pela viscosidade. Depois de misturado com a água apresenta-se como um gel incolor de textura fina.



Figura 0.6 - Reservatório onde a água proveniente do processo de lapidação é armazenada antes do tratamento (Viminas, 2013).

A água é transportada para um segundo silo após decantação, quando a água acumulada transborda, pois neste momento a água não contém flocos de vidro. Este segundo silo é o reservatório de água que será bombeada de volta para os galpões para ser reutilizada no processo de lapidação das chapas de vidro.

No primeiro silo, onde ocorre a decantação, o resíduo que se encontra no fundo é sugado para um agitador, onde é constantemente misturado de forma a não ocorrer o endurecimento do mesmo (Figura 2.7). O material que se

encontra no agitador é gradativamente bombeado para um filtro prensa para retirar a maior quantidade de água possível do resíduo e reaproveitá-la.



Figura 0.7 - Resíduo proveniente do silo de decantação depositado no tanque agitador, para evitar ressecamento da lama (Viminas, 2013).

O material resultante do filtro prensa é um sólido de aspecto acinzentado, levemente úmido. Após a secagem, porém, sua coloração é bem mais clara e apresenta aspecto engessado (Figura 2.8).



Figura 0.8 - Aspecto do resíduo após a passagem pelo filtro prensa (Viminas, 2013).

O processo de prensagem é realizado uma vez ao dia, que origina 290 kg de resíduo e, anualmente, em torno de 84 toneladas.

A Figura 2.9 apresenta o fluxograma que expressa o processo descrito anteriormente.

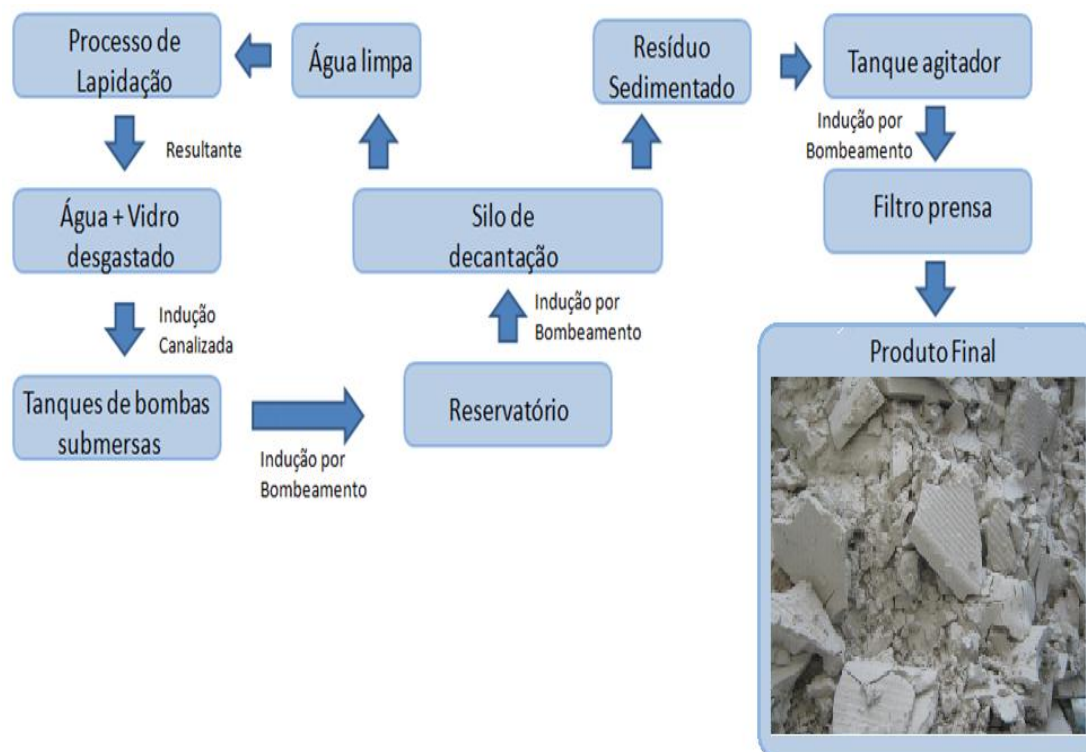


Figura 0.9 - Fluxograma do processo de obtenção do resíduo de lapidação de vidro sodo - cálcico utilizado neste estudo(adaptado de ANTÔNIO, 2011).

2.4 Aplicação do resíduo de vidro na construção civil

2.4.1 Considerações gerais

Existem diversos processos mediante os quais os resíduos de uma determinada atividade são utilizados em outro processo produtivo. Além disso, uma boa parte dos resíduos gerados possui valor comercial se forem adequadamente tratados e, portanto, eventualmente poderá se considerar o resíduo como uma matéria prima potencial (Nehdi *et al.*, 2005). A substituição de matérias-primas, por sua vez, pode ser uma oportunidade de minimizar as dificuldades de gestão de resíduos, reutilizando agregados e resíduos industriais não perigosos.

O emprego de adições minerais pode minimizar impactos ambientais por conta do aproveitamento de resíduos, maior preservação de jazidas de argila e calcário e redução nas emissões de gás carbônico e outros gases intensificadores do efeito estufa, gerados durante a fabricação do cimento Portland, além das vantagens técnicas e, em alguns casos, econômicas (Cordeiro, 2006).

As adições ou substitutos parciais do cimento tornaram-se uma parte integrante das misturas cimentícias. O uso de adições é vantajoso, pois melhora as propriedades mecânicas e a durabilidade de argamassas pelo seu benéfico impacto na microestrutura do material.

Algumas vantagens da incorporação de resíduos industriais em mistura cimentícia são:

- efeito filer introduzido pelos finos, que induz maior compacidade e aumento na resistência à compressão das argamassas;
- efeito pozolânico apresentado por alguns componentes;
- redução do consumo de cimento devido ao aumento de resistência resultante dos dois primeiros efeitos supracitados.

Pesquisas realizadas no intuito de aplicar os mais variados resíduos em materiais de construção têm aumentado, assim como os trabalhos de investigação sobre o uso de vidro moído como material pozolânico.

Reid (1998) relatou o uso de casco de vidro em várias vertentes, tais como: construção de estradas, pavimentação asfáltica, agregados de concreto, construção de aplicações (azulejos, tijolos de vidro, painéis de parede *etc.*), fibra de vidro para isolamento, fertilizantes agrícolas, paisagismo, louças, cimento hidráulico, entre outras aplicações.

O tipo de vidro comumente utilizado na construção civil é o vidro sodo-cálcico, que, em massa, representa 80% dos resíduos de vidro e sua composição é de aproximadamente 73% de SiO_2 , 13% Na_2O e 10% CaO . Assim, baseado em sua composição química, o vidro sodo-cálcico pode ser utilizado como material cimentício pozolânico, que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que finamente moído e na presença de umidade reage quimicamente com hidróxido de cálcio a temperaturas ambientes para formar compostos com propriedades cimentantes (Mehta e Monteiro, 2008).

2.4.2 Aplicação do resíduo de vidro em matrizes cimentícias

2.4.2.1 Reação álcali-sílica

Sabe-se que o vidro e o cimento são quimicamente incompatíveis. O alcaolide do cimento Portland e a sílica do vidro reagem na presença de umidade, resultando em uma reação química denominada reação álcali-sílica (RAS).

A solução presente nos poros e fissuras da argamassa é uma solução saturada em sódio e potássio e que podem reagir com determinados tipos de sílica (variedades criptocristalinas ou mesmo amorfas) que existam no agregado. A reação começa com o ataque à sílica não perfeitamente cristalizada pelos hidróxidos alcalinos da solução. Como resultado, forma-se um gel de silicatos alcalinos nos poros do agregado, onde existe sílica reativa, ou então, na superfície das partículas de agregado. Neste último caso forma-se uma superfície alterada típica, que pode vir a destruir a aderência entre as partículas de agregado e a pasta de cimento envolvente. A medida que o gel vai formando, resultam tensões internas cada vez mais elevadas, causando expansões, fissuração e ruptura da pasta de cimento (Coutinho, 1998).

Na Figura 2.10, é mostrada a ação do gel alcalino formado devido a RAS que, segundo Collins (2007), citado por Munhoz (2007), ao absorver água expande, exercendo pressão osmótica sobre a pasta de cimento ou o agregado.

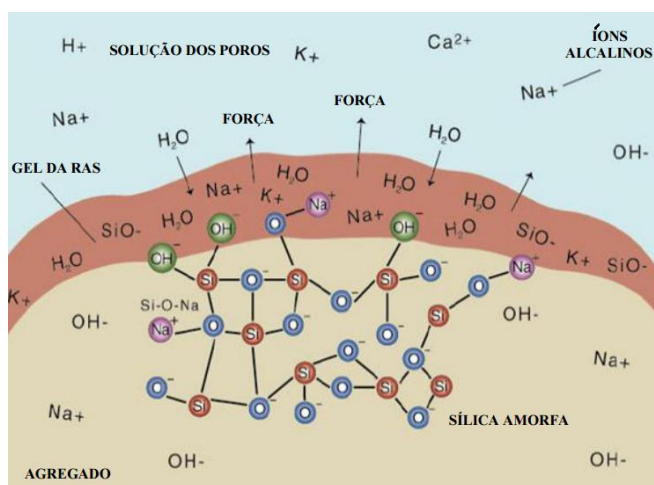


Figura 2.10 - Gel alcalino formado devido a RAS (adaptado de Munhoz, 2007, baseado em Collins, 2007).

A reação álcali agregado é de natureza físico-química e considerada lenta, ocorrendo em presença de água, entre os álcalis do cimento e alguns agregados reativos, causando o aparecimento do gel expansivo na interface pasta-agregado (Figura 2.11), devido a isso, estudos com o uso de vidro em misturas cimentícias em substituição ao agregado nem sempre tiveram bons resultados.

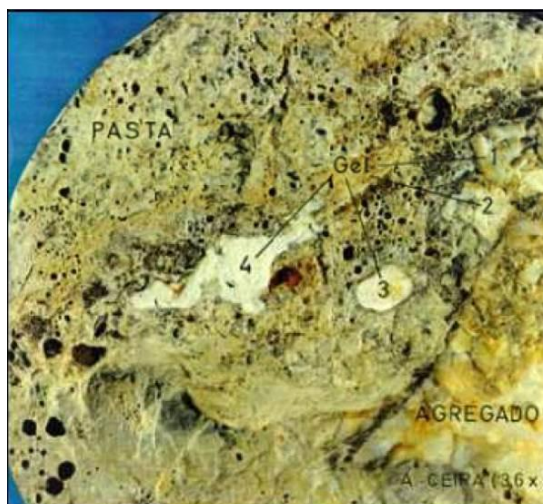


Figura 2.11 - Reação álcali-sílica reativa. Estados de alteração (1 a 4) de quartzo - filoneano em gel (Silva, 1992).

Os principais parâmetros que influenciam a formação do gel expansivo são (Coutinho, 1998):

- a reatividade dos agregados, que está relacionada com a presença de sílica amorfa, parcialmente cristalizada;
- quantidade de agregado reativo (ex.: alguns granitos e riolitos) e sua granulometria;
- concentração na solução intersticial em álcali e cálcio (quantidade interna de substâncias agressivas);
- tipo de cimento;
- condições ambientais (quantidade externa de substâncias agressivas, por exemplo, provenientes de sais descongelantes) e;
- quantidade de água disponível.

Para minimizar a reação álcali agregado, Coutinho (1998) listou alguns meios empregados para combater esta reação:

- não utilizar agregados com sílica reativa;
- utilizar cimentos com teor de álcali, expresso em óxido de sódio, inferior a 0,6% em relação à massa do cimento,

→ utilizar pozolânas, escória granulada de alto-forno entre outras adições em quantidade e qualidade suficientes;

→ usar baixas relações água/ligante;

→ evitar umidade, que é imprescindível para ocorrer à reação.

2.4.2.2 Influência da granulometria do resíduo de vidro nas reações álcali-sílica

De acordo com Idir *et al.* (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 à essa matriz pode promover a reação álcali-sílica (RAS), que provoca fissurações na matriz, influenciando o desempenho mecânico e a durabilidade.

Ismail e Al-Hashmi (2009), Idir *et al.* (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, Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Salomão *et al.* (2010), Wang (2011), Khmiri *et al.* (2012), Ling e Poon (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012) afirmam que as expansões devido à RAS são controladas apenas quando o resíduo de vidro é utilizado em fina granulometria, ou seja, partículas menores que 75 μm .

Shayan e Xu (2004) também estudou a influência do tamanho das partículas de vidro na RAS, chegando à conclusão que apenas as partículas com maior dimensão causaram expansão (Figura 2.12)

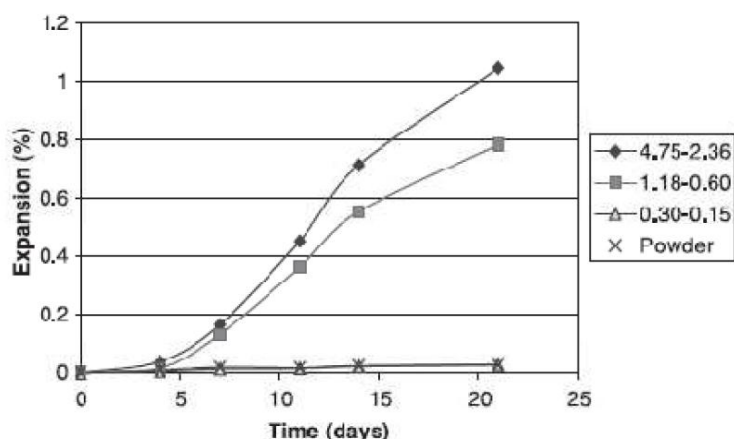


Figura 2.12 - Curvas de expansão de argamassa contendo partículas de vidro com diferentes granulometrias (Shayan & Xu, 2004).

Shi *et al.* (2005) observaram que, ao moer o resíduo para equiparar sua distribuição granulométrica com a do cimento, o resíduo passou a apresentar a superfície específica maior que a do cimento, devido à maior irregularidade da partícula de vidro. Paiva *et al.* (2010) e Matos e Souza (2012) também observaram essa morfologia das partículas de vidro. A Figura 2.13 mostra a maior irregularidade das partículas de resíduo de vidro em relação às partículas de cimento (Matos e Souza, 2012).

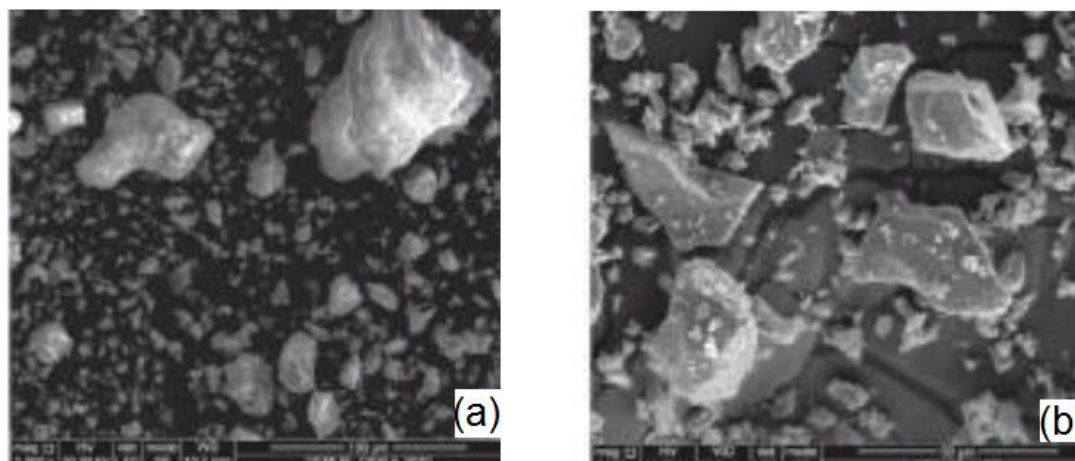


Figura 2.13 - Microscopias eletrônicas de varredura das partículas de cimento e resíduo de vidro. (a) cimento - ampliação 1000x; (b) resíduo de vidro - ampliação 2000x (Matos e Souza-Coutinho, 2012).

Ao avaliar a composição química dos resíduos de vidro, Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri *et al.* (2012) e Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012) observaram um alto teor de álcalis (Na_2O), acima dos limites estabelecidos pelas normas para materiais pozolânicos. Porém, apesar deste alto conteúdo alcalino, a expansão devido à 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.

Topçu *et al.* (2004) estudaram a expansão RAS de argamassas contendo resíduos de vidro em substituição ao agregado miúdo natural. A areia natural foi substituída por resíduos de vidro (tamanho de 4,75 - 0,3 mm) em 25, 50, 75 e 100%, em peso. Os resultados mostraram um aumento na expansão RAS com o aumento do teor de resíduo de vidro.

Na faixa de 75 μm o resíduo de vidro se torna um inibidor da RAS, pois devido à grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição, quando dividido em pequenas partículas, passa a apresentar alta atividade pozolânica. Esta característica é confirmada por Shi *et al.* (2005), Paiva *et al.* (2010), Khmiri *et al.* (2012), Matos e Souza-Coutinho (2012) e Pereira-de-Oliveira *et al.* (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 NBR 12653 (ABNT, 2015).

2.4.2.3 Estudos realizados com o aproveitamento do resíduo em matrizes cimentícias

A resistência mecânica do cimento é a propriedade mais importante em termos de utilização estrutural pelo que todas as normas fixam valores mínimos desta característica (Neville, 1995).

Shao *et al.* (2000) mediram a resistência mecânica de vidro sodo-cálcico como adição, através do índice de atividade pozolânica para três granulometrias, de 150 μm , 75 μm e 38 μm . O intuito dos ensaios foi examinar se o vidro moído poderia apresentar comportamento pozolânico. Os resultados indicaram que a resistência das argamassas contendo vidro com 38 μm como substituto parcial de cimento satisfaz o requisito mínimo no ensaio de resistência aos 7 dias de idade, e alcançou um aumento na resistência mecânica após 21 dias de cura em água. Relativamente ao vidro com 150 μm , a resistência mecânica foi muito abaixo do limite, porque o tamanho das partículas de vidro era muito grande para agir como pozolana. A resistência das argamassas com vidro com 75 μm aos 7 dias foi ligeiramente inferior ao valor inicial, enquanto que aos 28 dias a resistência aumentou satisfatoriamente.

Em um estudo, Shi *et al.* (2005) mostraram que a temperatura de cura é um parâmetro que altera a resistência mecânica de argamassa com pó de vidro, por apresentar influência sobre a atividade pozolânica. Quando a temperatura de cura é elevada para 35 ou 65°C, o índice de atividade

pozolânica do vidro aumenta significativamente no período de 1 a 28 dias. A resistência do cimento contendo 20% de vidro pode ser semelhante ou mesmo maior do que 100% de cimento Portland aos 7 dias a 23°C. Os resultados sugerem também que o pó de vidro é muito eficaz na melhoria da resistência da argamassa e do concreto, especialmente a temperaturas elevadas. À medida que a temperatura de cura foi aumentada 23 - 65°C, o valor da resistência aos 7 dias do cimento Portland puro foi diminuída 29-24 MPa, enquanto o vidro aumentou de 27 a 30 MPa, o que já era de se esperar, uma vez que temperaturas de cura mais elevadas são prejudiciais para o cimento Portland.

Karamberi *et al.* (2006) investigaram a influência do vidro em pastas cimentícias, com vista a utilizar o vidro como substituto do cimento. Os vidros verdes foram escolhidos devido à sua prevalência no mercado da Grécia como materiais de embalagem. Os corpos de prova foram preparados com 25% de substituição de cimento por resíduo de vidro contendo tamanho de partículas menores que 90 µm. A utilização de fragmentos de vidro colorido como substituição parcial de cimento foi satisfatório. Os ensaios de resistência à compressão e de atividade pozolânica demonstraram que o vidro finamente moído é um material aceitável.

Bardini e Marchioro (2007) utilizaram o vidro moído como parte do agregado miúdo natural (areia) em proporções de 0, 5, 10, 15 e 20% e granulometria entre 150 µm – 30 µm para a produção de concretos, objetivando, além da reutilização do material que seria descartado, obter melhores resultados relativos à resistência mecânica dos concretos nas idades de 7 e 28 dias. No que concerne à resistência à compressão, exceto pelo traço contendo 20% de substituição do cimento pelo pó de vidro, todos os traços atingiram valores médios superiores aos concretos referência. O melhor desempenho foi observado nos concretos com 5% de substituição, que atingiu resistência média 40% superior a do concreto sem substituição. Concluíram que o aumento significativo da resistência à compressão pode ser atribuído ao preenchimento dos vazios do concreto pelo vidro moído. No entanto, sugerem estudos aprofundados em relação às reações álcali-sílica e à efetiva atividade pozolânica do resíduo.

Estudos realizados por Matos e Coutinho (2012) sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas contendo resíduos de vidro como substituto ao cimento, forneceram resultados favoráveis em relação à trabalhabilidade, pois argamassas com 10 e 20% de substituição do cimento, tiveram melhora significativa na trabalhabilidade. Em termos das características químicas, o vidro pode ser considerado um bom material se o conteúdo alcalino for desconsiderado. O índice de atividade de pozolânica foi obtido em argamassa contendo resíduo de vidro aos 90 dias de cura, com aumento significativo entre 28 e 90 dias. Apesar do elevado conteúdo de álcali no resíduo, a expansão RAS foi baixa. A explicação para este fenômeno pode ser atribuída ao consumo de álcali na estrutura do C-S-H durante a reação pozolânica, que ocorre mais cedo do que a RAS e, por conseguinte, não deixando álcali suficiente para induzir a RAS.

Na Figuras 2.14 encontra-se esquematizada a sequência de reações que ocorrem até a formação da RAS, de acordo com Idir *et al.* (2010).

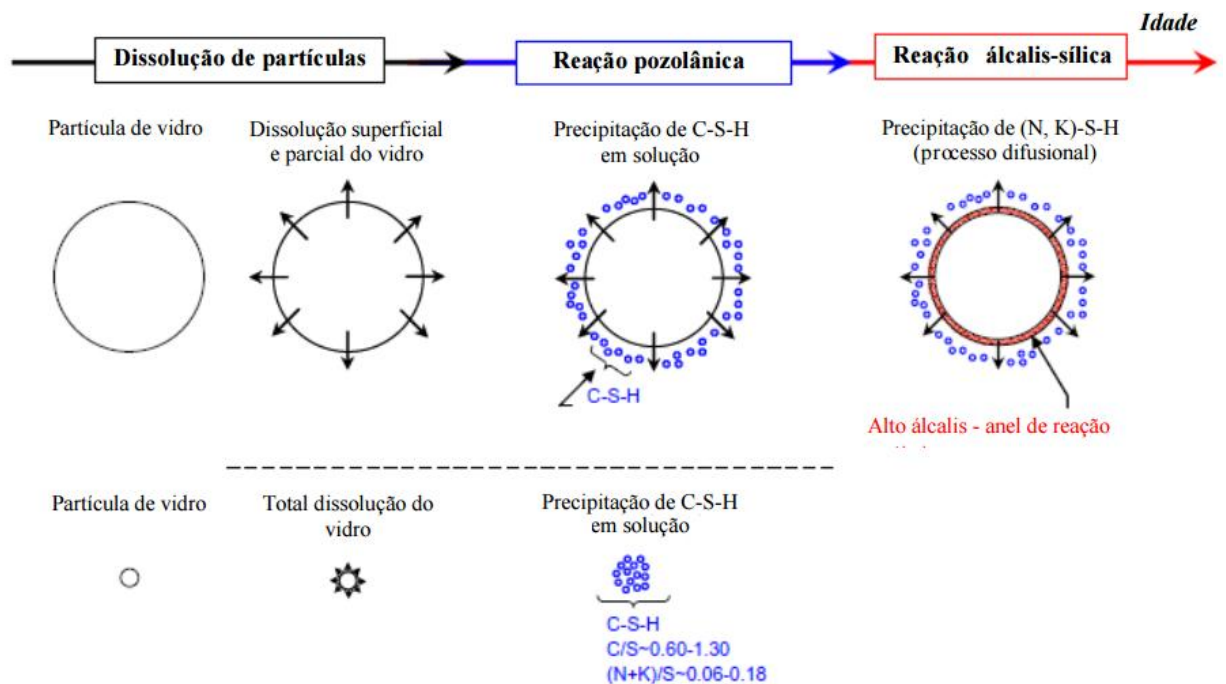


Figura 2.14 - Reações sucessivas de partículas de vidro grosso e fino (adaptado de Idir *et al.*, 2010).

Serpa *et al.* (2008), substituíram parcialmente o agregado miúdo natural em argamassas com vidro reciclado nos teores de 0, 5 e 20%, em peso. Os resultados mostraram que a substituição de agregado fino natural por resíduos

de vidro gerou um aumento na expansão RAS na idade de 14 dias. A expansão aumentou com o teor de vidro.

Limbachiya (2009) estudou a expansão RAS aos de 3, 7 e 14 dias em concretos contendo vidro (tamanho < 5 mm) como substituto de areia natural em teores de 0, 5, 10, 15 e 20%, em peso. Os resultados mostraram um aumento na expansão RAS com o aumento do teor de vidro e, conseqüentemente, menor resistência mecânica do concreto.

Kou e Poon (2009) também avaliaram a substituição de areia por vidro moído, porém a porcentagem de substituição foi de 15, 30 e 45%, divididas em duas séries, diferenciadas pela adição ou não de cinza volante, a fim de verificar possíveis expansões devido à reação álcali-sílica. As partículas de vidro possuíam dimensões entre 5 e 10 mm. Os resultados de resistência à compressão foram inferiores da argamassa com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro quando comparados com os da argamassa de referência (sem substituição). Estes resultados corroboram os resultados encontrados por Barroso *et al.* (2010), que avaliaram a resistência à compressão de argamassas com substituição de 0, 20, 25, 30, 35, 50, 75 e 100% do agregado miúdo natural por resíduo de vidro moído. Barroso *et al.* (2010) também verificaram que resistência à compressão diminuiu com o aumento no teor de substituição.

Ozkan e Yuksel (2008) avaliaram as propriedades de argamassas produzidas com substituições parciais do cimento por resíduo de vidro e subprodutos industriais: escória de alto forno e cinza volante. Os resultados de resistência à compressão são mostrados na Figura 2.15.

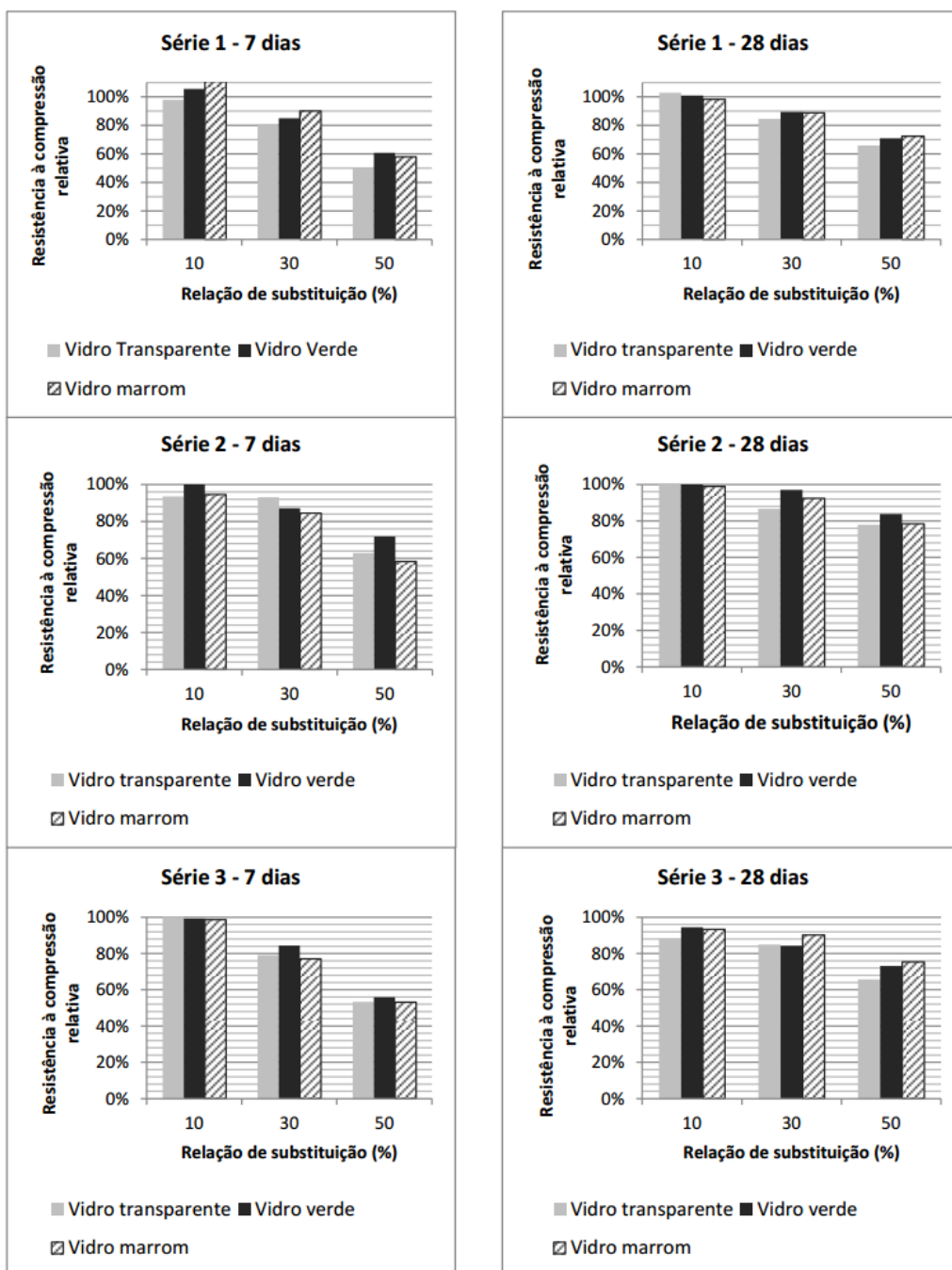


Figura 2.15 - Resistência à compressão aos 7 e 28 dias (Ozkan e Yuksel 2008).

Da Figura 2.15 verifica-se que, à medida que aumenta a proporção de substituição, o valor da resistência diminui, exceto para algumas. Para a idade de 7 dias, o valor máximo foi de 36,8 MPa, que é 10,7% maior que o valor de referência; o valor máximo aos idade de 28 dias foi de 47,6 MPa, que é apenas 3,8% maior que o valor de referência.

Ante o exposto, pode-se notar que o resíduo de vidro possui impacto significativo na expansão RAS.

2.4.2.4 Influência do resíduo de vidro nas propriedades das misturas cimentícias no estado fresco

As propriedades da matriz cimentícia, argamassa ou concreto, no estado fresco interferem significativamente no comportamento ao longo da vida útil do produto final, visto que várias propriedades da matriz no estado endurecido serão influenciadas pelas propriedades no estado fresco, podendo comprometer até mesmo a durabilidade.

A seguir serão apresentados alguns estudos com o pó de vidro, por vezes comparado com outros materiais.

De acordo com 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 está relacionada com a 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).

Segundo Dal Molin (2011), a forma e superfície específica das partículas definem o consumo de água das matrizes cimentícias com adições minerais. 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 à medida em que se aumentou o teor de resíduo de vidro nas misturas. A queda do índice de consistência pode ser devido à granulometria fina (abaixo de 75 μm) do resíduo utilizado, pois um material de maior superfície específica tende a demandar maior consumo de água.

Matos e Souza e Coutinho (2012) analisaram algumas propriedades das argamassas quando parte do cimento foi substituído por resíduo de vidro laminado, proveniente de parabrisas de automóveis. Os pesquisadores

verificaram que, com o aumento do teor de resíduo de vidro, houve um decréscimo na consistência e um aumento na resistência à penetração de íons cloretos. No que se refere à resistência à compressão, houve ganhos significativos entre os 28 e 90 dias nas misturas com substituição do cimento por resíduo de vidro.

Pereira-de-Oliveira *et al.* (2012) não notaram diferenças significativas entre a consistência das argamassas de referência e outras misturas com diferentes percentuais de resíduo de vidro. Entretanto, outros pesquisadores 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.

Estudos de Penacho (2012) e Du e Tan (2013a) com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo de vidro mostraram que houve queda da massa específica das misturas com o aumento do teor de resíduo de vidro. Para Carasek (2007), a massa específica dos materiais compósitos é uma função das massas específicas dos seus materiais constituintes. Assim, como a massa específica dos resíduos de vidro era menor que a massa específica da areia, essa característica foi comprovada.

Ainda avaliando as propriedades das argamassas no estado fresco, Oliveira e Costa (2015), ao substituir parte do cimento por resíduo de vidro, notaram que, apesar da argamassa de referência possuir uma maior retenção de água, a incorporação do pó de vidro tem influência relevante na medida em que a área específica dos constituintes foi diminuída, pois houve redução da área de molhagem. Em relação à retenção de água, Braga *et al.* e Silva *et al.*, verificaram aumento da retenção de água com a incorporação de finos, aumentando o tempo de manuseio da argamassa.

2.4.2.5 Influência do resíduo de vidro na resistência de aderência

A aderência não é uma propriedade muito estudada em matrizes cimentícias com incorporação de resíduo de vidro, já que o principal foco dos estudos são as propriedades relativas à argamassa. Segundo Carasek (2007),

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 de cimento 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, que contém em dissolução 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. Logo a etringita (C_6ASH_{32}) é a principal responsável pelo intertravamento da argamassa endurecida ao substrato e, conseqüentemente, pela boa aderência entre estes materiais (Carasek, 2007).

Dentre os inúmeros estudos, somente Penacho (2012) avaliou essa propriedade, produzindo argamassas com traço volumétrico 1:4, sendo parte da areia substituída por resíduo fino de vidro, nas porcentagens em volume de 0, 20, 50 e 100%, mantendo-se a curva granulométrica do agregado no processo de substituição, de modo a se ter como única variável o tipo de material. Após a análise dos resultados dos ensaios de arrancamento, Penacho (2012) concluiu que a aderência ao substrato diminuiu com o aumento da substituição de areia por resíduos de vidro devido o surgimento da RAS.

2.4.2.6 Influência do resíduo de vidro na microestrutura de matrizes cimentícias

As adições minerais podem produzir alterações na quantidade e na ordem de formação das fases sólidas das matrizes cimentícias. O efeito químico das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio para formação do silicato de cálcio hidratado, ou seja, estas adições tendem a melhorar a resistência mecânica das pastas de cimento hidratadas (Dal Molin, 2011).

Ao analisar a microestrutura, Antônio (2012) observou que os concretos não apresentaram fissuração devido à RAS. Além disso, ao comparar as

micrografias do concreto referência com as 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 a Figura 2.16.

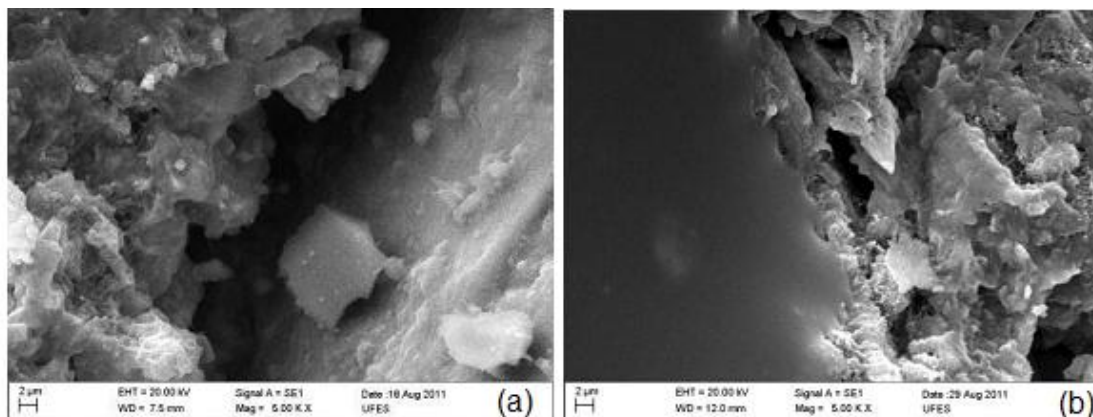


Figura 2.16 - Microscopias eletrônicas de varredura dos concretos de REF (a) e S20 (b), ampliadas em 5000x (Antônio, 2012).

Corinaldesi *et al.* (2005), ao analisar imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, concluíram que a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro nas argamassas tornou a microestrutura mais densa, como mostra a Figura 2.17.

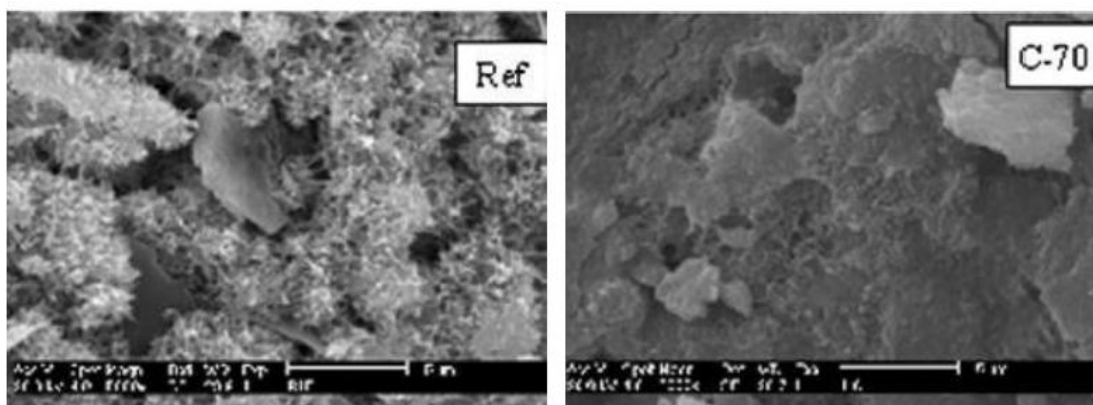


Figura 2.17 - Microscopias eletrônicas de varredura de argamassas de referência (Ref) e argamassa com incorporação de resíduo de vidro (C-70), ampliadas em 5000x (Corinaldesi *et al.* 2005).

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 de referência e a 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.

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, e conseqüentemente, aumento significativo da resistência mecânica das argamassas.

2.5 Argamassa colante

2.5.1 Breve histórico

Anteriormente ao surgimento das argamassas colantes, o assentamento de placas cerâmicas era feito com argamassas convencionais, sem uso de aditivos, as quais eram confeccionadas nos canteiros de obras. A camada de argamassa utilizada era de aproximadamente 20 mm de espessura, o que acarretava grandes perdas de água, tanto por sucção como por evaporação (Fiorito, 1994).

No Brasil, a primeira argamassa colante surgiu por volta de 1971, inspirada na *dry-set mortar*, que já vinha sendo empregada nos Estados Unidos, Europa e Japão (Ohama, 1984). Essa denominação se devia ao fato da argamassa ser uma mistura pronta, necessitando, unicamente, do acréscimo de água.

Na década de 80, as indústrias brasileiras passaram a produzir a argamassa colante em maior escala, surgindo a necessidade de normatização específica. O Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados, CB-18 da ABNT, iniciou os estudos para normatização das argamassas colantes em 1994 (Silva, 2003), tendo sido os projetos de norma aprovados e publicados em 1998, dando origem à ABNT NBR 14081 (1998) e ABNT NBR14086 (1998).

No tocante às normas para a produção de argamassa, a atual ABNT NBR 14081-1 (2012) trata apenas de argamassa colante industrializada à base de cimento Portland, especificando três classes (ACI, ACII e ACIII), designadas

pela sigla AC (argamassa colante), seguidas dos algarismos romanos (I, II, III) em função da resistência de aderência à tração e do tempo em aberto.

A argamassa colante tipo I é uma argamassa com menor teor de cimento e aditivos químicos, sendo indicada para revestimentos internos, exceto em áreas especiais, como sauna, churrasqueira, estufas e outras. A do tipo II é utilizada para revestimentos cerâmicos em ambientes internos e externos, com propriedades que diminuem a interferência de temperatura e umidade típica de trabalho ao ar livre. A argamassa do tipo III serve para revestimentos cerâmicos em ambientes internos e externos, sendo composto por uma maior quantidade de cimento e aditivos químicos, proporcionando, assim, aderência superior entre as interfaces em relação às argamassas do tipo I e tipo II.

A ABNT NBR 14081-1 (2012) especifica valores de resistência de aderência à tração maior ou igual a 0,5 MPa para assentamento de cerâmicas na vertical para argamassas AC I, AC II, e para as argamassas AC III maior ou igual a 1,0 MPa (Tabela 2).

Tabela 0.2 - Propriedades fundamentais para argamassas colantes.

Requisito		Método de ensaio	Unid.	Critério		
				ACI	ACII	ACIII
Tempo em aberto		ABNT NBR 14081-3/12	min	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura	Cura normal	ABNT NBR 14081-4/12	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura submersa			≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura em estufa				≥ 0,5	≥ 1,0

A norma acrescentou ainda que cada uma das classes pode ser classificada em ACI-E ou D, ACII-E ou D ou ACIII-E ou D. Opcionalmente verifica-se as propriedades da Tabela 3, considerando aplicações especiais.

Tabela 0.3 -Propriedades opcionais para argamassas colantes.

Requisito	Método de ensaio	Critério
Tempo em aberto estendido (E)	ABNT NBR 1408-3/12	Argamassa do tipo I, II ou III com tempo em aberto estendido no mínimo 10 min, além do especificado como propriedade fundamental
Deslizamento reduzido (D)	ABNT NBR 14081-4/12	Argamassa do tipo I, II ou III com deslizamento menor ou igual a 2 mm
As siglas “E” e “D” relativas respectivamente às propriedades opcionais de “tempo em aberto estendido” e “deslizamento reduzido”, devem estar marcadas nas embalagens das argamassas colantes destinadas a atender a tais propriedades.		

2.5.2 Comportamento reológico das argamassas colantes

As argamassas colantes são formadas pela composição de agregados, aglomerantes, aditivos, água e eventualmente adições. No estado fresco, assume-se que estas composições são suspensões concentradas de partículas sólidas (agregados) imersas em um líquido viscoso (pasta ou matriz).

O estudo da reologia de argamassas se torna cada vez mais importante, devido à necessidade de maior produtividade nos canteiros de obra, somada às exigências de mercado. A avaliação destas propriedades possui estreita relação com o comportamento real da mistura em obra, podendo subsidiar a formulação de produtos com alta qualidade e produtividade (Pereira, 2012; Costa, 2006; Cardoso *et al.*, 2005; Cardoso *et al.*, 2009).

Para entender as propriedades reológicas do fluido, faz-se necessária a análise tanto dos fenômenos que ocorrem na matriz, como os que derivam dos agregados, para que se tenha uma visão global do seu comportamento reológico. Quando uma força de cisalhamento é aplicada ao material, um gradiente de velocidade é induzido neste fluido. O fator de proporcionalidade entre a força e o gradiente da velocidade chama-se viscosidade, caracterizado como sendo o coeficiente de resistência do fluido à continuidade do escoamento (Bauer, 2005; Pileggi, 2001). Deste modo, quanto maior este coeficiente, mais difícil é o escoamento do fluido, ou mais viscoso ele é.

A viscosidade pode ser extraída a partir da curva de taxa de cisalhamento. A viscosidade é um indicador de coesão entre as moléculas de lâminas adjacentes do fluido (Oliveira *et al.*, 2000; Malkin, 1994). Esta característica também pode indicar a facilidade de um material escoar continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento externa. Quanto menor a viscosidade de um fluido, menor a tensão necessária para impor uma taxa de velocidade constante. A viscosidade pode ser calculada pela relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento (Banfil, 1993; Malkin, 1994; Steffe, 1996; Oliveira *et al.*, 2000), conforme a Eq.1.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad [\text{Eq. 01}]$$

onde τ = tensão de cisalhamento; η = viscosidade; $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento.

O estudo da reologia das argamassas colantes é uma importante ferramenta para análise da viscosidade e tensão de escoamento das misturas. Sua aplicação proporciona classificar os materiais, analisar seus comportamentos frente a um campo de tensão, relacionar estes comportamentos com sua estrutura, bem como prever o desempenho em outros estágios de tensão, deformação, tempo e temperatura (Tanner, 1998). Tendo em vista que as argamassas são aplicadas no estado fluido, o desempenho reológico é fundamental para facilitar a aplicação da argamassa e o assentamento das placas cerâmicas, evitando possíveis problemas de descolamento no estado endurecido.

A aplicação da argamassa se dá no estado fluido; logo, o comportamento reológico deve ser a base para o aperfeiçoamento tecnológico de produção e solução de problemas de descolamento. Um método bastante difundido para caracterização reológica de argamassas no estado fresco é o *squeeze flow*. Este ensaio, que é aplicado a argamassas convencionais de assentamento e revestimento, encontra-se normatizado pela ABNT NBR 15839 (2010), é utilizado para avaliação de diversos materiais heterogêneos, como compósitos poliméricos. No ensaio, o escoamento do material decorre da aplicação de uma carga de compressão sobre a amostra no estado fresco, a qual ocasiona deslocamentos em seu interior devido aos esforços de

cisalhamento radiais originados durante o fluxo (Costa, 2006; Cincotto e Pileggi, 2007).

O ensaio permite o controle da magnitude das deformações e também das taxas de cisalhamento aplicadas ao material, podendo ser realizado com controle de força ou deslocamento. O método permite a aplicação de patamares de relaxação e a determinação de parâmetros reológicos como viscosidade e tensão de escoamento, possibilitando simulações dos esforços semelhantes àqueles sobre os quais estão sujeitas as argamassas colantes na prática (Costa, 2006).

Os resultados deste ensaio podem ser demonstrados tanto por curvas de carga *versus* tempo ou carga *versus* deslocamento. O perfil típico obtido de um ensaio de *squeeze flow* com controle por deslocamento, expresso na forma de carga *versus* deslocamento apresenta três regiões bem definidas, conforme mostra na figura 2.18 (Costa, 2006; Cardoso, 2009).

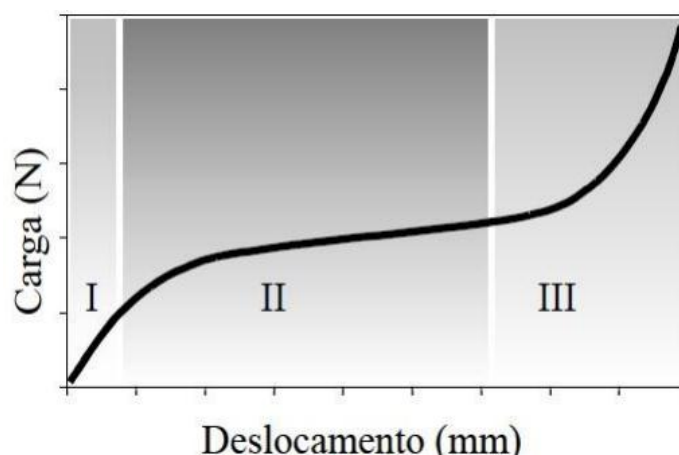


Figura 2.18 - Curva típica de carga *versus* deslocamento de um ensaio de *squeeze flow* (Cardoso, 2009).

No primeiro estágio, sob pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear. Uma argamassa que apresente parcela significativa nesse estágio possivelmente apresentará problemas de fissuração ainda no estado fresco, devido à recuperação elástica após a retirada do esforço após a passagem da desempenadeira.

No estágio seguinte, sob deformações intermediárias, a compressão resulta em deformação radial e de cisalhamento, superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e, assim, flui por

deformação plástica e/ou viscosa, dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, o que aparenta ser um comportamento apropriado para aplicação e espalhamento de argamassas.

Já no terceiro estágio, no qual o material é submetido à grandes deformações, pode ocorrer aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para o deslocamento. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema (fibras por exemplo) submetido à grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo, devido à maior interação (embricamento ou entrelaçamento) das unidades móveis. Provavelmente, este é um estágio de comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento do material devem estar dificultados, devido às altas cargas (tensões) necessárias para deformá-lo, possivelmente ocasionando acabamento defeituoso.

A análise da curvas carga *versus* deslocamento permite avaliar o comportamento reológico das argamassas colantes nos diferentes momentos de sua aplicação, partindo de uma condição estacionária até um alto nível de deformação, cisalhamento e restrições geométricas durante a sua aplicação.

A Tabela 2.4 mostra a caracterização tecnológica no que se refere aos requisitos reológicos das argamassas colantes.

Tabela 0.4 - Reologia para argamassas colantes

Características	Identificação	Limites	Método
Capacidade de retenção de água (%)	Normal	≥ 80 e ≤ 90	NBR 13277/05
	Alta	> 90	
Teor de ar incorporado (%)	A	< 8	NBR 13278/05
	C	≥ 8 e ≤ 18	
	B	> 18	

2.5.3 Substrato padrão

Maciel (1998) afirma que a aderência de uma argamassa no tardo de uma placa é uma propriedade que o revestimento tem em manter-se fixo ao

substrato, através da resistência às tensões normais e tangenciais que surgem na interface base-revestimento, resultado da resistência de aderência à tração, da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa.

De acordo com Urban e Takamura (2005), as argamassas colantes deveriam ser capazes de absorver as tensões que ocorrem entre a placa cerâmica e o substrato/base, de forma a prevenir problemas, sendo que os comuns são as fissuras e o deslocamento das placas cerâmicas. Esses pesquisadores acreditam que somente com o emprego de argamassas especiais, capazes de absorver deformações diferentes, pode garantir a durabilidade do revestimento cerâmico.

Caso se desenvolvam fissuras perpendiculares ou paralelas à interface com o substrato, durante ou após o endurecimento, tanto o assentamento como o revestimento, tornam-se sujeitos à penetração de água e, a longo prazo, prejudicará a durabilidade da edificação.

Um conjunto de parâmetros influencia a aderência, entre eles: propriedades da argamassa no estado fresco, procedimentos de execução do revestimento, natureza e características da base e limpeza superficial.

Devido à sensível influência da absorção capilar e textura da superfície sobre a qual a argamassa colante é aplicada, torna-se necessário padronizar a base de assentamento, permitindo o controle de qualidade na produção e conformidade com a ABNT NBR 14081-2 (2015).

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental buscou avaliar propriedades consideradas básicas para o bom desempenho de uma argamassa colante modificada, envolvendo ensaios, como determinação do teor de ar incorporado, retenção de água, deslizamento, índice de consistência, massa específica, resistência de aderência à tração e tempo em aberto. Para isso, foram feitas primeiramente, a caracterização dos materiais que foram utilizados na produção das argamassas, bem como a caracterização do resíduo de vidro.

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, a execução e a análise do 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).

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura. Para isso é preciso saber, em primeiro lugar, o que se busca.

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 se obter as variáveis de resposta, ou seja, os aspectos que permitem quantificar as características de qualidade do produto final (RIBEIRO e CATEN, 2010).

Para isso, foram definidas primeiramente quais as variáveis envolvidas na pesquisa. Elas foram divididas em fatores constantes, fatores controláveis e variáveis de resposta (Tabela 3.1).

Tabela 0.5 - Variáveis envolvidas na pesquisa.

Fatores constantes	Relação água/cimento - 0,7
	Relação material cimentício/agregado - 1:2 (em massa)
	Índice de consistência – $260 \pm 5\text{mm}$
	Origem dos materiais
	Procedimento de moagem e granulometria do resíduo
	Preparação e moldagem dos corpos de prova
Fatores controláveis	Teor de substituição do cimento por resíduo de vidro - 0, 10, 15 e 20% em relação à massa de cimento
	Teor de substituição da areia por resíduo de vidro - 0, 10, 15 e 20% em relação à massa de areia
Variáveis de resposta	Massa específica
	Retenção de água
	Resistência de aderência à tração
	Tempo em aberto
	Deslizamento
	Teor de ar incorporado
	<i>Squeeze flow</i>

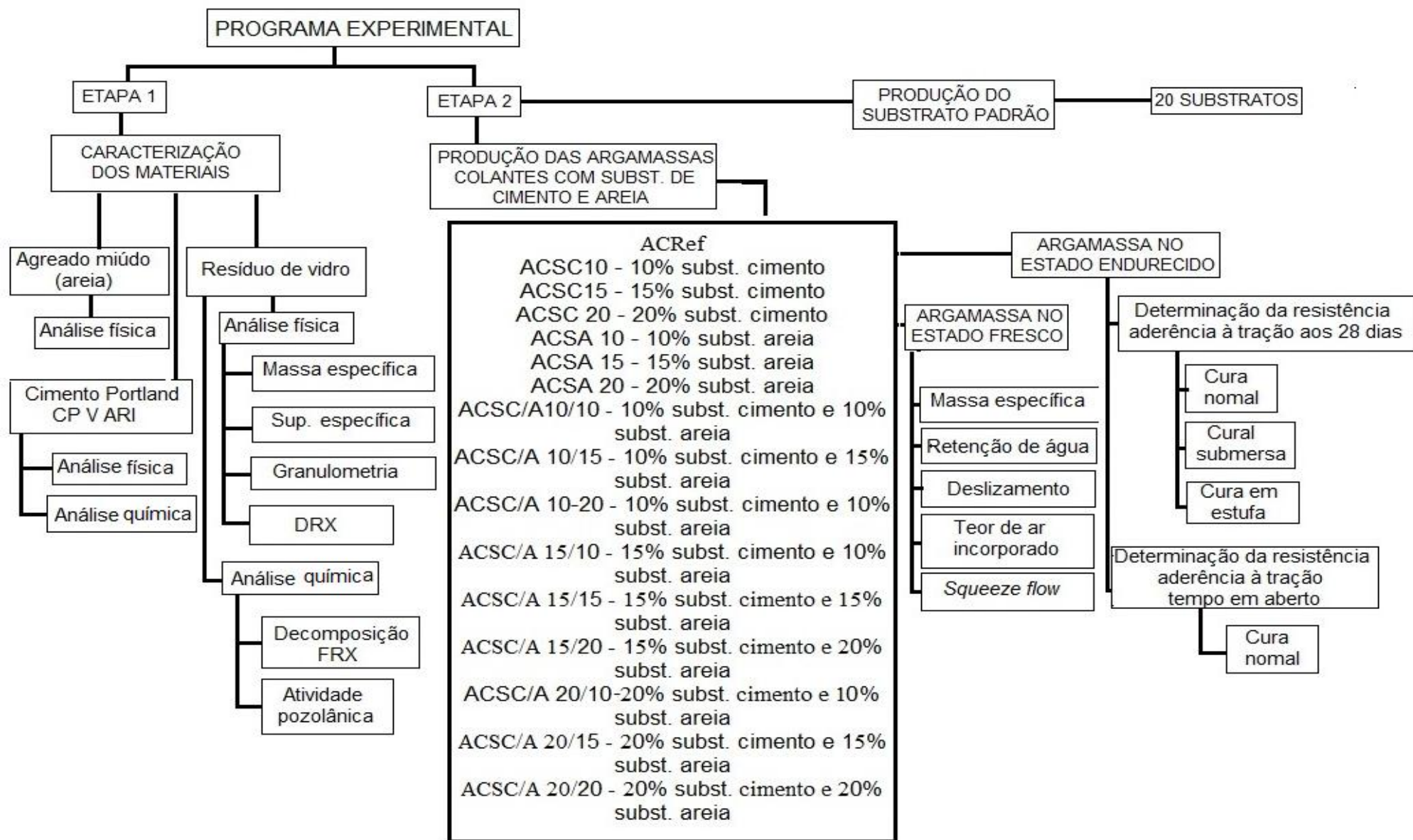
3.2 Apresentação geral do experimento

A partir das variáveis adotadas, diferentes combinações foram geradas para os ensaios de cada etapa do programa experimental. Para o estudo das argamassas no estado fresco, 16 combinações foram adaptadas, a saber: 4

ensaios foram realizados, 2 vezes para cada uma das combinações de argamassa em momentos imediatos à finalização de sua produção, totalizando 128 ensaios no estado fresco.

É importante destacar que os resultados obtidos são importantes, principalmente quando as propriedades físicas e químicas são conjuntamente analisadas, para que, eventualmente, uma conclusão concisa e bem embasada seja feita a respeito da aplicação do resíduo como substituto parcial do cimento Portland CPV ARI e da areia quartzosa em argamassas. O estudo para ensaios das argamassas no estado endurecido envolveu 16 combinações, conforme o seguinte procedimento: três corpos de prova para cada combinação foram ensaiados para a determinação do tempo em aberto e o mesmo procedeu-se para a determinação da resistência de aderência à tração aos 28 dias, com três tipos de cura (normal, em estufa e submersa). De posse destes dados, foi estabelecido o número total de 184 corpos de prova.

O resíduo coletado foi submetido à uma série de análise, a fim de se determinar suas propriedades químicas, físicas e microestruturais. Os ensaios foram realizados dentro do planejamento experimental nas datas previstas de forma que os equipamentos utilizados fossem os mesmos em todos os procedimentos, sendo também mantido o mesmo procedimento durante os experimentos. A Figura 3.1 mostra o organograma das fases de caracterização dos materiais utilizados e dos ensaios realizados nas argamassas.



3.3 Materiais

Para a confecção das argamassas colantes e moldagem dos 192 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: cimento Portland CP V ARI, cedido pela Votorantim Cimentos, areia quartzosa, água potável, aditivos modificadores de viscosidade e retentores de água, e resíduo de vidro, cedido pela Viminias do Espírito Santo.

3.5.1 Cimento Portland CPV ARI

O cimento utilizado foi do tipo Portland de alta resistência inicial – CP V ARI, de acordo com a norma ABNT NBR 5733 (1991). A escolha desse tipo de cimento se deu por conter menor teor de adições entre os disponíveis no mercado nacional, possibilitando melhor avaliação dos resultados com incorporação dos resíduos. A distribuição granulométrica e a caracterização física e química do cimento CPV ARI foram fornecidas pelo fabricante, exceto a massa específica, que foi determinada no LECIV/UENF (Figura 3.2 e Tabela 3.2).

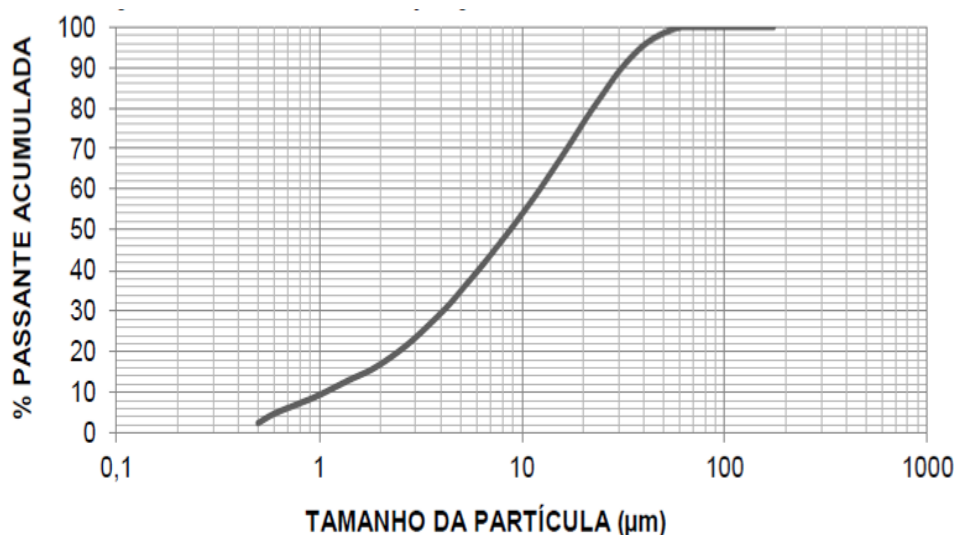


Figura 3.2- Distribuição granulométrica do CPV ARI (Votorantim Cimentos - 2015).

Tabela 3.2- Caracterização do cimento CP V ARI (Votorantim Cimentos, 2015).

Propriedades	Teores	Método de Ensaio	Limites NBR 5733 (ABNT, 1991)
Análises físicas			

Massa específica (g/cm³)		3,05	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (m ² /kg)	445	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 3000
	Finura - resíduo na peneira 400#	2,1	NBR 11579 (ABNT, 2012)	N.E.
Tempos de pega	Início de pega (min)	133	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de pega (min)	187	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≤ 600
Análises químicas				
Perda ao fogo - PF (%)		3,68	NBR NM 18 (ABNT, 2004)	≤ 4,5
SiO₂ (%)		19,21	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
CaO (%)		63,58	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
MgO (%)		0,78	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Al₂O₃ (%)		5,15	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
Fe₂O₃ (%)		2,90	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
K₂O (%)		0,80	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
SO₃ (%)		2,76	NBR 14656 (ABNT, 2001)	≤ 4,5
Resíduo insolúvel - RI (%)		0,92	NBR NM 15 (ABNT, 2004)	≤ 1,0
Resistência à compressão				
1 dia (MPa)		17,8	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 14
3 dias (MPa)		30,6	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 24
7 dias (MPa)		38,8	NBR 7215 (ABNT, 1997)	≥ 34
Nota: N.E. – Não especificado. Os dados relativos ao cimento CPV ARI foram cedidos pela empresa fabricante.				

3.5.2 Aditivos

Os aditivos são matérias-primas importantes para as propriedades das argamassas colantes, pois melhoram sua capacidade de retenção de água,

permitindo a adequação do tempo em aberto. Entre estes agentes destacam-se os hidróxietil celulose (HEC) e metil-hidróxietil celulose (MHEC), sendo os mais empregados nas argamassas colantes, tendo-se ainda o PVA (polivinil álcool). Para a produção das argamassa foram utilizados os aditivos HEC e PVA.

O HEC tem como principal propriedade a retenção de água, que é um polímero de celulose natural modificada produzido pela eterificação parcial de alguns grupos hidroxila da celulose como a álcali celulose, que, por sua vez, reage com o óxido de etileno para a formação do HEC. O HEC aumenta a plasticidade e a coesão da argamassa, evitando o deslizamento da placa cerâmica, deixando a argamassa mais trabalhável e retarda os tempos de pega que ampliam o tempo em aberto (Póvoas e John, 1999).

O PVA aumenta a resistência à compressão, à flexão e de aderência, além de reduzir a permeabilidade da argamassa. O PVA envolve os grãos do cimento, tornando a argamassa mais densa e homogênea, aumentando sua flexibilidade e plasticidade, e pelo fato de possuir protetor coloidal em sua composição, retém água, retardando a formação superficial de uma “película”, a qual impede a aderência da placa à pasta da argamassa. (Póvoas e John, 1999).

3.5.3 Agregados

O agregado miúdo selecionado para a produção das argamassas foi uma areia quartzosa média obtida no leito do Rio Paraíba do Sul, classificada de acordo com a norma NBR 7211 (ABNT, 2009). Os resultados da distribuição granulométrica (Tabela 3.2) atenderam aos limites da zona utilizável, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009). A caracterização física foi realizada de acordo com a norma correspondente a cada propriedade, conforme notas contidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3- Distribuição granulométrica da areia.

Peneira (mm)**	Massa retida (%)**	Massa acumulada (%)**
4,75	0	0
2,36	0	0
1,18	5	5

0,60	26	31
0,30	23	54
0,15	24	78
FUNDO	22	100
*NBR 7211 (ABNT, 2009) ** NBR NM 248 (ABNT, 2003)		

Tabela 3.4- Caracterização da areia.

Propriedades	Métodos de ensaio	Resultados
Módulo de finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,71
Abaixo da peneira # 200 (%)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)	0%
Massa específica (g/cm³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,63
Material pulverulento	NBR NM 46 (ABNT, 2003)	4,96%

3.5.4 Resíduo de pó de vidro

O resíduo utilizado foi coletado na ETE (Estação de tratamento de efluentes) instalada na Viminás, indústria beneficiadora de vidros localizada no município de Serra, região metropolitana da Grande Vitória, estado do Espírito Santo. Para a aplicação o resíduo em lama foi seco e destorroado.

Apesar do resíduo ser resultante de um processo de polimento que gera partículas muito finas, houve necessidade de destorroa (Figura 3.3), pois, após a passagem pela prensa na ETE, o resíduo fica empedrado depois de seco.



Figura 3.3 - Equipamento utilizado para destorroar o resíduo.

Foram realizadas 2 moagens com duração de 1 hora cada, sendo utilizados 4 kg de resíduo de vidro seco em estufa a 100°C até massa constante. No fim da moagem o resíduo foi peneirado para equiparar a granulometria da areia.

Após esse procedimento, verificou-se que os grãos apresentavam-se ainda com uma dimensão superior à desejada em relação ao cimento (Figura 3.4). Optou-se então pelo processo de moagem utilizando o moinho de bolas usando esferas cerâmicas., para que a finura do resíduo se equiparasse à do cimento. Porém, antes do processo de moagem, o resíduo foi homogeneizado, quarteado e acondicionado em sacos plásticos.



Figura 3.4 - Resíduo seco e destorroado.

Para a realização da moagem foi necessário secar o resíduo em estufa a 100°C por 24h, pois, por se tratar de um material muito fino, absorvia umidade do ambiente com muita facilidade. A Figura 3.5 mostra o moinho utilizado e a Figura 3.6 o resíduo após o processo de moagem.



Figura 3.5 - Resíduo no moinho de bolas.



Figura 3.6 - Resíduo moído.

Após esse processo foram realizados os ensaios de caracterização física e química. Inicialmente, o resíduo foi submetido à análise de granulometria, possibilitando a constatação de que 70% das partículas ficaram abaixo de 40 μm , sendo 50% menores do que 10 μm (Figura 3.7).

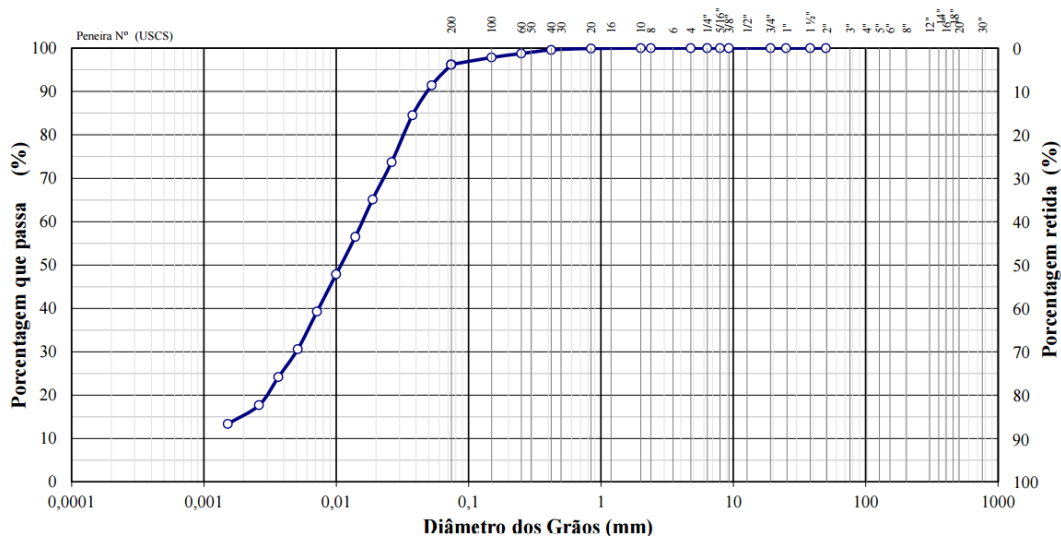


Figura 3.7 - Distribuição granulométrica do resíduo de vidro

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), obtendo-se o valor de 2,49 g/cm³. A superfície específica foi determinada pelo método de Blaine, normatizado pela NBR 16372 (ABNT, 2015) e apresentou 3685,7 cm²/g, inferior a cimento utilizado, que possui superfície específica de 4450 cm²/g.

Foi feita análise química do vidro por fluorescência de raios X pelo método analítico, em forma de pó. O equipamento utilizado foi um espectrômetro por fluorescência de raios X PW2400 da Phillips, munido de tubo de Rh de 3 KW de potência, seis cristais analisadores e dois detetores (selado e fluxo). O software utilizado para as análises foi o SemiQ, desenvolvido pela Phillips e que acompanha o equipamento, pertencente ao Laboratório de Fluorescência de Raios X da UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Verificou-se que o resíduo de vidro é principalmente constituído de sílica (67,9%), e sódio como segundo componente, apresentando, assim, uma quantidade elevada de álcalis (Tabela 3.5).

Tabela 3.5- Caracterização do resíduo estudado.

Óxidos	(%)
SiO ₂	67,9
Na ₂ O	13,6
CaO	8,4
MgO	2,4
Al ₂ O ₃	2,3
Fe ₂ O ₃	1,3
K ₂ O	0,3
SO ₃	0,3
TiO ₂	0,2
NiO	0,1
ZrO ₂	0,1
Cr ₂ O ₃	0,1
P ₂ O ₅	0,06
CuO	0,04
Perda ao fogo	2,9
Total	100

A composição química do resíduo apresentou concentração de óxido de alumínio (Al₂O₃). Isso é devido à utilização de floculantes e clarificantes para o tratamento do efluentes provenientes dos galpões onde ocorre a lapidação das chapas de vidro.

Na Figura 3.8 mostrou a imagem do resíduo obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizada no Laboratório de Materiais – LAMAV/UENF e a Figura 3.9 mostra o difratograma de raios X do resíduo.

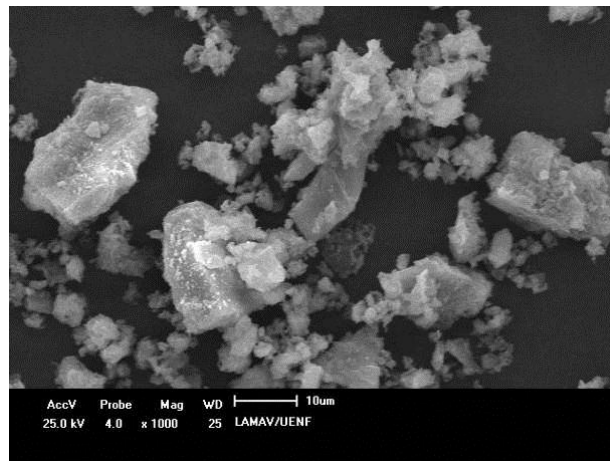


Figura 3.8 - Micrografia obtida por MEV das partículas de resíduo de vidro com ampliação de 1000x.

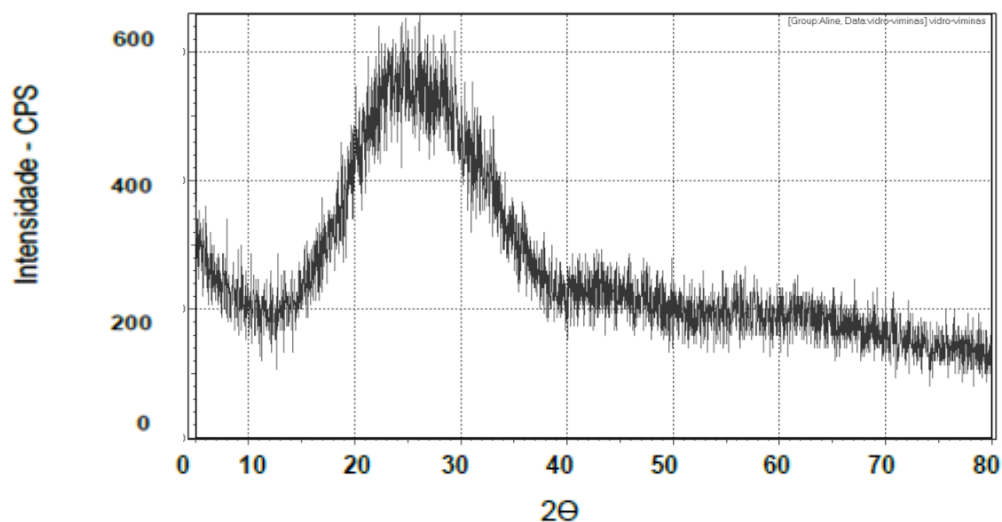


Figura 3.9- Difratograma de raios X do resíduo de vidro.

Na Figura 3.8 pode-se visualizar o formato das partículas do resíduo, que se apresentam com muitas faces, mostrando que a partícula é bastante angulosa.

Na Figura 3.9 é possível observar que o resíduo está, no estado amorfo e por apresentar um teor significativo de sílica, é possivelmente um material potencialmente pozolânico.

Para esta constatação compararam-se as propriedades químicas do resíduo com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 12653 (2015). Essa norma define como pozolana um material silicoso ou sílica-aluminoso finamente moído que sozinho possui pouco ou nenhum valor cimentício. Porém, à temperatura ambiente e na presença de umidade reagem

quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos com propriedades cimentícias, os silicatos estáveis.

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



onde,

CH: hidróxido de cálcio;

H: H₂O (água);

C-S-H: silicato de cálcio hidratado.

Para verificação da pozolanicidade do resíduo, compararam-se as propriedades químicas com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 12653 (2015), para a classificação de um material pozolânico.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 3.6, o resíduo pode ser classificado como material pozolânico classe C, porém apresenta elevado conteúdo alcalino.

Tabela 3.6 - Comparação dos requisitos químicos mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2015).

Propriedades	Limites para diferentes classes de material pozolânico			Resíduo de vidro
	N	C	E	
SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃, % mín	70	70	50	71,5
SO₃, % máx	4,0	5,0	5,0	0,3
Perda ao fogo, % máx	10,0	6,0	6,0	2,8
Álcalis disponíveis em Na₂O, % máx	1,5	1,5	1,5	13,6

Os diferentes resíduos de vidro estudados por Matos e Souza-Coutinho (2012), Khmiri et al. (2012) e Pereira-de-Oliveira et al. (2012) também apresentaram teores de álcalis (Na₂O) acima dos limites estabelecidos para materiais pozolânicos. Matos e Souza-Coutinho (2012) verificaram que, apesar do alto conteúdo alcalino, a expansão devido à reação álcali-sílica foi significativamente reduzida com a incorporação do resíduo de vidro nas argamassas. Isso ocorre, já que o consumo do álcali na formação do C-S-H

durante a reação pozolânica antecede a reação álcali-sílica, não restando álcali suficiente para induzir essa reação deletéria.

De acordo com a ABNT NBR 12652 (2014), o índice de atividade pozolânica deve ser de no mínimo 75% da resistência à compressão do cimento aos 28 dias.

Os resultados encontrados no ensaio de índice de atividade pozolânica do resíduo de vidro com cimento, realizados de acordo com a ABNT NBR 12652 (2014), são mostrados na Figura 3.10.

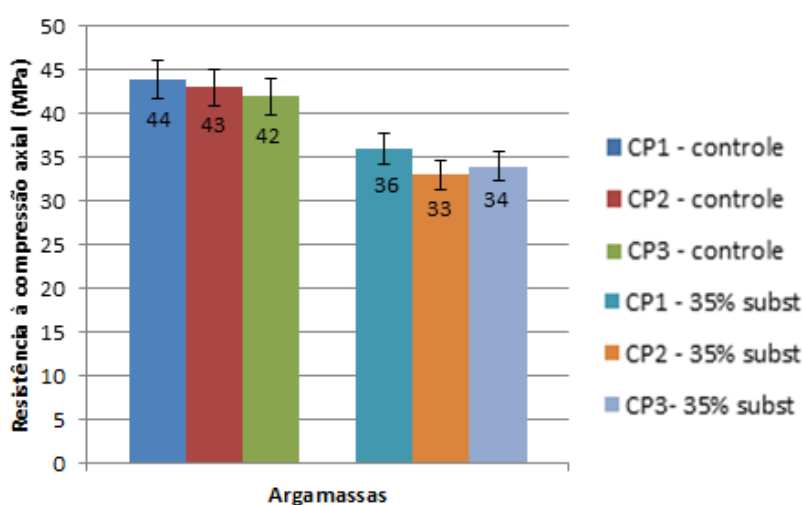


Figura 3.10 – Resultados individuais de resistência à compressão para verificação do índice de atividade pozolânica.

Os resultados do ensaio para verificação do índice de atividade pozolânica encontram-se na Tabela 3.7, sendo o índice de atividade encontrado para o resíduo igual a 79,7%, superior ao mínimo estabelecido pela norma, indicando a pozolanicidade do resíduo do vidro utilizado neste estudo.

Tabela 3.7 - Resultados do ensaio do índice de pozolanicidade.

Amostra	Resistência Média (MPa)	Desvio relativo (%)	I (%)
Argamassa controle	43,5	0,84	-
Argamassa com substituição	34,6	1,56	79,7

A técnica proposta por Luxán et al. (1989), de medir a evolução da atividade pozolânica através da condutividade elétrica, também foi realizada. A Tabela 3.8 apresenta o resultado da condutividade elétrica para o resíduo de vidro em pó aferida durante 20 min. Pode-se observar que a condutividade

elétrica diminui devido à menor quantidade de íons cálcio Ca^{+2} e hidroxilas $(OH)^{-}$ na solução.

Tabela 3.8 - Resultado da condutividade elétrica do resíduo de vidro.

Amostra	Condutividade (mS/cm)		Diferença de condutividade
	Inicial	Final	
1	8,12	6,88	1,24
2	8,82	7,26	1,56

A classificação proposta por Luxán et al. (1989) é apresentada na Tabela 3.9, onde ΔC é a variação de condutividade no intervalo de tempo de 2 minutos após a inclusão do resíduo à mistura. O resíduo ensaiado apresentou variação de condutividade aos 2 minutos, o que o classifica como um resíduo de boa atividade pozolânica.

Tabela 3.9 - Tabela de classificação da pozolanicidade do material, proposta por Luxán et al.(1989).

Classificação do material	Varição da condutividade (ΔC)
Não pozolânico	$\Delta C < 0,4$
Pozolanicidade moderada	$0,4 < \Delta C < 1,2$
Boa pozolanicidade	$\Delta C > 1,2$

3.4 Métodos

Com base na revisão bibliográfica foram estabelecidas as dosagens, bem como os teores de substituição e os ensaios para a determinação das propriedades das argamassas colantes.

3.4.1 Estudo de dosagem e preparo das argamassas

Estudos realizados com aplicação de vidros moídos em argamassas demonstram a utilização dos traços experimentais adotados neste estudo. Shi et al. (2005), Paiva et al. (2010), Wang (2011) e Matos e Souza-Coutinho (2012), por exemplo, encontraram resultados favoráveis no desempenho de argamassas com até 15% de substituição do cimento. Com o intuito de avaliar este desempenho, os teores de substituição adotados nesta pesquisa serão de 10, 15, 20% do material cimentício, e 10, 15 e 20% de substituição do agregado, além da argamassa referência. Os diferentes traços das argamassas foram denominados de acordo com o percentual de substituição.

Tabela 3.10 Resumo das argamassas.

Nome	Descrição
ACRef	argamassa de referencia
ACSC10	argamassa colante com 10% de subst. de cimento em massa
ACSC15	argamassa colante com 15% de subst. de cimento em massa
ACSC 20	argamassa colante com 20% de subst. de cimento em massa
ACSA 10	argamassa colante com 10% de subst. de agregado em massa
ACSA 15	argamassa colante com 15% de subst. de agregado em massa
ACSA 20	argamassa colante com 20% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 10-10	argamassa colante com 10% de subst. de cimento e 10% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 10-15	argamassa colante com 10% de subst. de cimento e 15% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 10-20	argamassa colante com 10% de subst. de cimento e 20% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 15-10	argamassa colante com 15% de subst. de cimento e 10% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 15-15	argamassa colante com 15% de subst. de cimento e 15% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 15-20	argamassa colante com 15% de subst. de cimento e 20% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 20-10	argamassa colante com 20% de subst. de cimento 10% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 20-15	argamassa colante com 20% de subst. de cimento e 15% de subst. de agregado em massa
ACSC/A 20-20	argamassa colante com 20% de subst. de cimento 20% de subst. de agregado em massa

De modo a se obter uma argamassa colante com resistência mínima satisfatória, foram produzidos três traços diferentes, baseado em estudos anteriores sobre argamassa colante. O primeiro traço foi de 1:3 com 0,2% do aditivo HEC e 0,2% do aditivo PVA com $a/c = 0,49$, porém não obteve resistência mínima para argamassa. O segundo de 1:2; 0,26% do aditivo HEC e 0,26 aditivo PVA com $a/c = 0,7$ atingiu resistência mínima de uma argamassa colante ACI e a terceiro traço obteve uma resistência superior a mínima considerada para uma argamassa colante ACI com a proporção de 1:2; 2,5%

aditivo HEC; 2,5% aditivo PVA; a/c =0,7. A partir dos resultados optou utilizar o terceiro traço.

Os traços e as dosagens das argamassas, de acordo com o teor de substituição do cimento pelo resíduo de vidro, estão descritos na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Quantidade de materiais (em massa).

Traço	CPV-ARI	Resíduo (cimento)	Areia	Resíduo (areia)	a/c
ACRef	1,00	0,00	2,00	0,00	0,7
ACSC10	0,90	0,1	2,00	0,00	0,7
ACSC15	0,85	0,15	2,00	0,00	0,7
ACSC 20	0,80	0,20	2,00	0,00	0,7
ACSA 10	1,00	0,00	1,90	0,1	0,7
ACSA 15	1,00	0,00	1,85	0,15	0,7
ACSA 20	1,00	0,00	1,80	0,20	0,7
ACSC/A 10-10	0,90	0,1	1,90	0,1	0,7
ACSC/A 10-15	0,90	0,1	1,85	0,15	0,7
ACSC/A 10-20	0,90	0,1	1,80	0,20	0,7
ACSC/A 15-10	0,85	0,15	1,90	0,1	0,7
ACSC/A 15-15	0,85	0,15	1,85	0,15	0,7
ACSC/A 15-20	0,85	0,15	1,80	0,20	0,7
ACSC/A 20-10	0,80	0,20	1,90	0,1	0,7
ACSC/A 20-15	0,80	0,20	1,85	0,15	0,7
ACSC/A 20-20	0,80	0,20	1,80	0,20	0,7

As argamassas foram confeccionadas em misturador mecânico, modelo AG5 Metal Cair, (Figura 3.11), de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14081-2 (2015).

A mistura mecânica foi feita por 60 segundos com velocidade, da pá do misturador, de rotação em torno do eixo de 140 ± 5 rpm. Após a mistura mecânica a argamassa foi coberta, no próprio misturador, por um pano úmido por 15 minutos e em seguida misturado novamente por 15 segundos.



Figura 3.11 - Misturador mecânico.

3.4.2 Produção do substrato padrão

O substrato padrão onde se fixou os corpos de provas, foi produzido conforme a ABNT NBR 14081-2 (2015) com emprego dos seguintes materiais: tela de aço eletrossoldado, areia, pedrisco e cimento, com relação água/cimento 0,45 a 0,5, consumo mínimo de cimento de 400 kg/m³ e traço em massa igual a 1:2,6:1,3. Todos esses dados são fornecidos pela norma.

Foram produzidos moldes metálicos com as dimensões de 25 cm x 50 cm x 2,0 cm, (Figura 3.12), de acordo com a ABNT NBR 14081-2 (2015), com absorção de água inferior a 0,5%.



Figura 3.12 - Molde metálico com tela de aço

Após a montagem dos moldes, efetuou-se a limpeza para a retirada de impurezas, para não influenciar na consistência do concreto e, em seguida, fez-se necessária a aplicação de óleo nas superfícies para facilitar a desmoldagem

do substrato. As telas de aço eletrossoldadas com o espaçadores de plástico foram posicionadas dentro do molde.

A cura do concreto seguiu as condições especificadas pela ABNT NBR 14081-2 (2015). Após 24 horas executou-se a desmoldagem do substrato, que em seguida foi levado para a cura submersa até completar 7 dias. Na sequência, retirou-se o substrato da cura submersa, o qual foi deixado em ambiente climatizado de laboratório, completando assim sua cura por mais 21 dias.

3.4.3 Ensaios das argamassas no estado fresco

A fim de avaliar o efeito do resíduo de vidro incorporado na argamassa, foram realizados ensaios em laboratório para caracterização das propriedades no estado fresco.

3.4.3.1 Consistência por espalhamento e massa volumétrica da argamassa

Foram feitos os ensaios para determinação de consistência pelo espalhamento do tronco de cone na mesa, realizados conforme ABNT NBR 13276 (2005). Este ensaio permite avaliar a trabalhabilidade das argamassas.

Por meio do ensaio de determinação de densidade de massa, de acordo com a ABNT NBR 13278 (2005), avaliou-se avaliar a influência dos resíduos de vidro na massa volumétrica no estado fresco da argamassa.



Figura 3.13 - Preparo para o ensaio de densidade de massa.

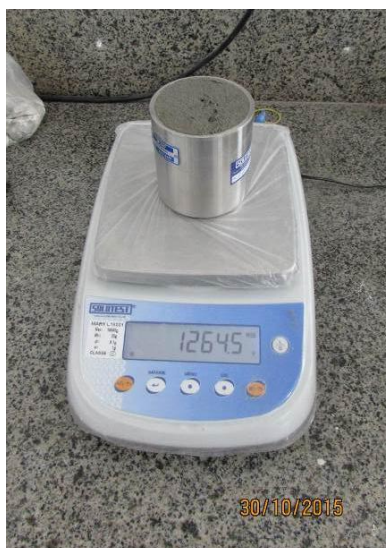


Figura 3.14 - Ensaio de densidade de massa

A massa volumétrica da argamassa no estado fresco é determinada através da seguinte equação:

$$\rho_{fi} = (M_{ai} - M_r) / V \quad [\text{Eq. 02}]$$

sendo;

ρ_{fi} - massa volumétrica da argamassa *i* no estado fresco [g/dm³];

M_{ai} - massa do recipiente com a amostra da argamassa [g];

M_r - massa do recipiente [g];

V - volume do recipiente, previamente conhecido [70 dm³].

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.

3.4.3.2 Retenção de água

A retenção de água é a capacidade que a argamassa tem, no estado fresco, de manter sua consistência, mesmo em situações propícias à perda de água. A água é responsável pelo transporte de produtos da hidratação do cimento para os poros e cavidades do substrato, favorecendo a ancoragem mecânica, tendo assim influência direta no estado endurecido da argamassa colante (Groot, 1988; Carasek et al., 2001; Costa, 2006).

Este ensaio permite averiguar quais as eventuais consequências que a incorporação de resíduos de vidro produz na propriedade referente à retenção de água de uma argamassa.

Neste ensaio, a avaliação da capacidade de retenção de água é realizada por um procedimento de sucção, sendo determinada a quantidade de água (posteriormente expressa em percentagem) retida na argamassa, após o referido procedimento (Figura 3.15). A retenção de água em argamassas é avaliada pelo método proposto pela ABNT NBR 13277 (2005).



Figura 3.15 - Ensaio de Retenção de água

A retenção de água interfere nas reações químicas dos aglomerantes da argamassa, que exigem uma quantidade adequada de água. A resistência mecânica, a aderência e a durabilidade são propriedades que dependem da retenção de água da argamassa.

Nas argamassas colantes a retenção de água é importante na medida em que a adesão ao revestimento cerâmico é prejudicada pela perda de água por sucção pelo substrato ou ainda pela formação de película no cordão da argamassa colante devido a migração de polímeros orgânicos. (Póvoas, 2005).

3.4.3.3 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado corresponde à quantidade de ar existente em um determinado volume de argamassa, geralmente expresso em percentagem, sendo a trabalhabilidade de uma argamassa influenciada por este parâmetro.

Pode-se encontrar vazios preenchidos por ar dentro da argamassa de duas formas: através de bolhas de ar incorporado ou através de vazios de ar aprisionado (Mehta e Monteiro - 2008).

O controle do teor de ar incorporado é fundamental ao controle da qualidade da argamassa, quer seja para verificar limites máximos desejáveis

de ar incorporado, ou para identificar teores de vazios de ar que influenciam na resistência mecânica, uma vez que o material apresenta porosidade.

Os ensaios de determinação de teor de ar incorporado foram realizados de acordo com a ABNT NBR 13278 (2005).

3.4.3.4 Squeeze flow

Este ensaio analisa o escoamento do material decorrente da aplicação de uma carga de compressão sobre a amostra no estado fresco, a qual ocasiona deslocamentos no seu interior devido aos esforços de cisalhamento radiais originados durante o fluxo. Os resultados desse ensaio evidenciam a consistência do material, mostrando a aplicabilidade no canteiro de obra, ou mesmo na comparação entre argamassas.

Nesta pesquisa serão utilizadas as configurações normalizadas pela ABNT NBR 15839 (2010) para argamassa básica, com modificações para adaptar-se às argamassas colantes. A velocidade de aplicação de carga utilizada, ou seja, a taxa de cisalhamento será de 0,1 e 1,0 mm/s.

3.4.3.5 Deslizamento

Deslizamento é o ato indesejável de escorregamento das placas cerâmicas sobre os cordões frescos de argamassa colante, quando assentadas sobre uma superfície vertical ou inclinada (Póvoas et al., 1997). É uma propriedade reológica da argamassa colante. Este ensaio permitiu avaliar a influência da variação do teor de resíduos de vidro no escorregamento das argamassas.

O deslizamento de a argamassa ocorrer se a tensão de cisalhamento for inferior à tensão resultante dos pesos da argamassa e da placa cerâmica. Portanto, o parâmetro que define se a argamassa irá deslizar ou não é a tensão de escoamento, que é a tensão a partir da qual a argamassa inicia seu escoamento. Por outro lado, a velocidade com que a argamassa escoar é definida pela sua viscosidade.

O ensaio de deslizamento é preconizado pela ABNT NBR 14081-5 (2012), que estabelece o método para determinar o deslizamento de placas

cerâmicas quando assentadas com argamassa colante, pelo método da camada fina.

O ensaio de deslizamento é realizado a partir do posicionamento de três placas cerâmicas no substrato padrão na posição vertical (Figuras 3.16 a 3.18). As placas cerâmicas são quadradas, com lado de $100 \pm 1\text{mm}$, apresenta absorção menor que 0,5% e com massa de $195 \pm 5\text{g}$. A posição dos cordões formados nas argamassas são de acordo com a ABNT NBR 14081-5 (2012), de modo a ficar na vertical durante o ensaio.

Decorridos 20 minutos do posicionamento do substrato padrão na vertical, retorna-se o mesmo à posição horizontal e mede-se o deslizamento em cada placa cerâmica em relação a uma referência. A Eq. 03 mostra o cálculo do deslizamento (L):

$$L = \sum (L_f - L_i) / 6 \quad [\text{Eq. 03}]$$

onde,

L_f = leitura da posição final, expressa em milímetros (mm);

L_i = leitura da posição inicial, expressa em milímetros (mm).



Figura 3.16 - Verticalidade do substrato padrão.



Figura 3.17 - Posicionamento das placas cerâmicas no substrato padrão.



Figura 3.18 - Após 20 minutos de ensaio.

Diversos parâmetros influenciam os resultados deste ensaio, a saber: condições de temperatura e umidade no local de ensaio; tamanho e peso do corpo de prova (placa cerâmica); diferenças entre corpos de prova (fabricante, peso, superfície e absorção); perpendicularidade do aparato para acomodação do substrato padrão; nivelamento da bancada; planicidade da desempenadeira e tamanho dos dentes (6 mm x 6 mm x 6 mm); impregnação do tardo (superfície de aplicação) do corpo-de-prova após grande quantidade de ensaios (aproximadamente 10); limpeza e secagem dos corpos de prova; interferência da rugosidade e planicidade dos substratos e quantidade de argamassa entre cordões.

3.4.4 Ensaios no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios mecânicos de resistência, aderência à tração aos 28 dias e tempo em aberto.

Os corpos de prova foram mantidos até a data do ensaio em cura, atendendo as prescrições estabelecidas pela ABNT BR 14081-4 (2012).

3.4.4.1 Determinação do tempo em aberto

O tempo em aberto refere-se ao maior intervalo de tempo entre a aplicação da argamassa colante estendida em cordões sobre o substrato e o assentamento da placa cerâmica sobre estes cordões, de modo a obter-se uma resistência de aderência adequada (DIN, 1977).

Para os ensaios de determinação do tempo em aberto foram produzidos 48 corpos de prova, seguindo a metodologia descrita na ABNT NBR 14081-3 (2012). Posteriormente à moldagem, os corpos de prova foram identificados, e após 15 minutos as placas cerâmicas foram assentadas sobre a argamassa colante e submetidas à cura normal, como descrito na ABNT NBR 14081-4 (2012). Após 28 dias de cura da argamassa, foram realizados os ensaios para obtenção da tensão de ruptura (Figura 3.19).



Figura 3.19 - Tempo em aberto nas argamassas após 15 minutos.

O cálculo da tensão de ruptura (σ_t) de cada placa cerâmica é obtido da seguinte equação:

$$\sigma_t = T/A \quad [\text{Eq. 04}]$$

onde,

σ_t = tensão de ruptura (MPa);

T = carga de ruptura (N);

A = área da placa cerâmica (mm²).

3.4.4.2 Determinação da resistência de aderência à tração

Para os ensaios de resistência de aderência à tração foram confeccionados 192 corpos de prova, conforme ABNT NBR 14081-3 (2012).

Após a moldagem, as placas cerâmicas foram assentadas sobre a argamassa colante, identificadas e submetidas à cura normal, em estufa e

submersa, até a data de realização do ensaio. Os ensaios de resistência de aderência consistem em de 10 placas cerâmicas coladas sobre o substrato padrão.

Na cura normal o conjunto permaneceu durante 28 dias em condições ambientais do laboratório (temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $60 \pm 4\%$, sem presença de vento), conforme mostra a Figuras 3.20.



Figura 3,20 - Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas cerâmicas em cura normal.

Na cura com imersão em água, os corpos de provas permaneceram durante 7 dias sob condições de laboratório e, em seguida, foram imersos em água a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 21 dias (Figura 3.21).



Figura 3.21 - Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas cerâmicas em cura submersa em água.

Por fim, na cura em estufa os corpos de prova permaneceram durante 14 dias, sob condições ambientais de laboratório e, em seguida, foram

colocados na estufa com temperatura de $70 \pm 2^\circ\text{C}$ por mais 14 dias para o término da cura (Figura 3.22).



Figura 3.22- Substrato padrão com a argamassa aplicada e pastilhas cerâmicas em cura em estufa (70°C).

Após 28 dias de cura, pastilhas de metal com a mesma dimensão da placa cerâmica foram coladas com resina epóxi no topo de cada placa cerâmica, para determinação da resistência de aderência à tração. Foi utilizado um aparelho de arrancamento com capacidade de 5 kN e velocidade de $250+50 \text{ N/s}$ (Figura 3.23).



Figura 3.23 – Ensaio de arrancamento

Durante o ensaio também foi analisado o tipo de ruptura (Figura 3.24) que é classificado de acordo com a ABNT NBR 14081-4 (2012) como:

- S – ruptura no substrato;
- S/A – ruptura na interface argamassa e substrato;
- A – ruptura na camada de argamassa colante;
- A/P – ruptura na interface argamassa e placa cerâmica.

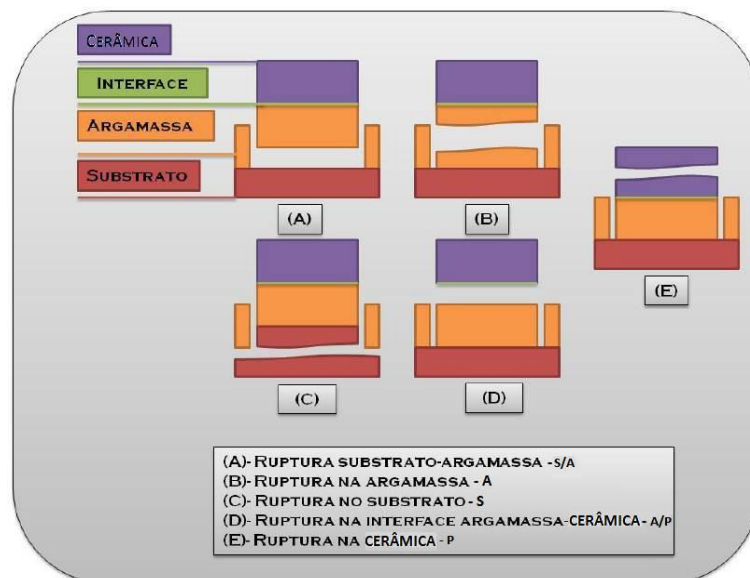


Figura 3.24 – Tipos de ruptura no ensaio de determinação de resistência de aderência à tração de revestimento (adaptado de Cincotto *et al.*,1995).

3.1.1.1 Análise estatística

Os resultados obtidos nos ensaios 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, em nível de confiança de 95%, do efeito das variáveis investigadas, por meio da análise de variância (ANOVA). 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 fator controlável sobre as variáveis de resposta é determinado por um teste de comparação entre valores calculados (F_{cal}) e os valores tabelados (F_{tab}) de uma função de distribuição de probabilidade de Fisher. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o $F_{calculado}$ for maior do que o $F_{tabelado}$.

O nível de significância dos resultados pode ser analisado 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 do que o adotado, este determinado fator ou interação de fatores exerce influência significativa sobre a variável de resposta analisada.

Quando se analisa os resultados em conjunto com os valores médios tabelados (média aritmética de três corpos de prova) das tabelas correspondentes a cada ensaio, pode-se verificar a predominância em conjunto de determinado ensaio sobre o outro, em relação à variação do teor de resíduo na mesma propriedade. Como consequência, podem-se julgar quais teores de resíduos são melhores ou piores 0, 10, 15 e 20% estatisticamente.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. Os resultados estão ordenados e agrupados de forma a facilitar sua leitura e compreensão. Inicialmente são abordados os resultados relativos aos ensaios realizados no resíduo de vidro laminado, para verificação da pozolanicidade. Em seguida, são analisados os resultados dos ensaios nas argamassas no estado fresco, a determinação da massa específica, o deslizamento, o teor de ar incorporado e a retenção de água, e no estado endurecido, resistência de aderência à tração aos 28 dias e tempo em aberto. Os resultados relativos aos ensaios foram submetidos à uma análise estatística.

4.1. Ensaios realizados nas argamassas no estado fresco

As argamassas no estado fresco foram caracterizadas por meio de massa específica, deslizamento, teor de ar incorporado, ensaio *squeeze flow* e retenção de água, pois 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 são afetadas pelas condições de aplicação deste material no estado fresco, podendo comprometer até mesmo a durabilidade.

Foram produzidas 16 argamassas com seus diferentes traços: substituição de cimento (0, 10, 15, 20%), substituição de areia com teores de 0,10 15 e 20% e substituição de cimento e areia concomitantemente.

4.1.1. Densidade de massa e teor de ar incorporado

Os ensaios para determinação de densidade de massa e do teor de ar incorporado das argamassas no estado fresco foram realizados de acordo com a NBR 13278/05. Como o resíduo apresenta massa específica menor do que a do cimento, a incorporação deste resíduo nas argamassas influenciou na densidade de massa das misturas.

De acordo com os os valores médios obtidos apresentados na Tabela 4.1, há tendência de queda no valor da densidade de massa com o aumento do

teor de resíduo incorporado. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada traço de substituição. Os resultados individuais dos ensaios teor de ar incorporado estão apresentados no Anexo I.

Os resultados deste ensaio corroboraram aqueles encontrados por Ismail e Al-Hashmi (2009), Nassar e Soroushian (2012), Penacho (2012) e Du e Tan (2013a), pois o resíduo apresentou massa específica menor do que a do cimento e a da areia.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio de massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco.

Traço	Densidade de massa (g/cm³)	Teor de ar incorporado (%)
ACRef	1,47	28,40
ACSC10	1,45	28,99
ACSC15	1,44	29,45
ACSC 20	1,40	31,34
ACSA 10	1,39	31,68
ACSA 15	1,39	32,2
ACSA 20	1,38	32,37
ACSC/A 10-10	1,39	31,88
ACSC/A 10-15	1,38	32,5
ACSC/A 10-20	1,37	32,65
ACSC/A 15-10	1,39	31,48
ACSC/A 15-15	1,39	31,69
ACSC/A 15-20	1,38	32,11
ACSC/A 20-10	1,39	31,69
ACSC/A 20-15	1,38	31,97
ACSC/A 20-20	1,38	31,99

Os resultados obtidos nos ensaios que determinaram o teor de ar incorporado foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre o teor de ar incorporado.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	valor-ρ	Ftab	Resultado
Substituição da areia	57,466	3	19,155	387,089	3,26E-25	2,901	Significativo
Substituição do cimento	2,875	3	0,958	19,366	2,41E-07	2,901	Significativo
Interações	13,937	9	1,548	31,293	2,15E-13	2,189	Significativo
NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher; Ftab = valor tabelado para distribuição de Fisher; Valor- ρ = probabilidade de significância							

Observando-se os valores de F_{cal} e F_{tab} pode-se notar a intensidade de influência dos parâmetros. Desse modo, constata-se que a variável mais influente sobre os resultados de teor de ar incorporado foi o teor de substituição de areia, sendo a interação entre os parâmetros influência secundária. O percentual de substituição de cimento é o de menor influência, embora todos os fatores sejam estatisticamente significativos, uma vez que o valor de F_{cal} de cada variável é maior do que o F_{tab} correspondente. Além disso, apresentam o p -valor menor que 0,05, ou seja, são estatisticamente significativos em nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exercem influência no teor de ar incorporado.

O teor de ar incorporado é um parâmetro que influencia bastante na trabalhabilidade, pois quanto mais leve a argamassa, maior a trabalhabilidade e o tempo em que se mantém trabalhável. Isto possibilita reduzir o esforço durante a sua aplicação, resultando em maior produtividade. Porém, vale lembrar que o ar incorporado, que corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa, apesar de favorecer a trabalhabilidade, prejudica a resistência mecânica.

Pela análise da Figura 4.1, conclui-se que as argamassas com incorporação de agregados finos de vidro apresentam maiores teores de ar incorporado relativamente à argamassa de referência, sendo que tal propriedade aumenta com o teor de substituição.

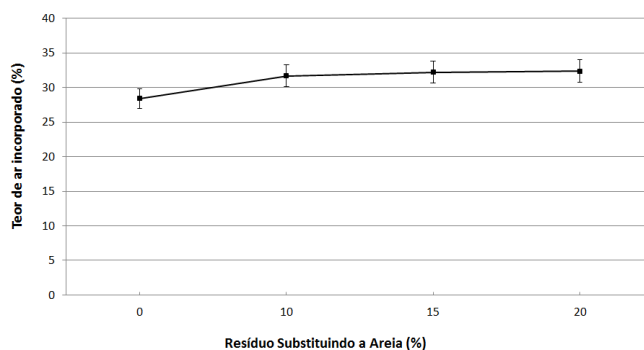


Figura 4.1- Efeito do resíduo substituindo a areia.

Tal tendência pode ser justificada pelo fato de os resíduos finos de vidro apresentarem maior angulosidade. De fato, quanto maior a angulosidade das partículas e, portanto, menor a sua esfericidade, menor será a compacidade, isto é, menos eficaz será o empacotamento das partículas, resultando em

maiores volumes / índice de vazios e, conseqüentemente, em maior teor de ar incorporado (logo, menor massa volúmica nos estados fresco e endurecido).

4.1.2. Retenção de água

De acordo com DUJAB (2000), a retenção de água é influenciada pela finura do aglomerante e está diretamente relacionada com a superfície específica. Quanto mais finas as partículas, maior a área específica e maior a retenção de água. Este aumento de retenção de água pode ser conseguido de várias formas, seja aumentando os materiais constituintes com maior área específica, assim como utilizando aditivos que impeçam a perda de água, isto é, aditivos retentores de água (ALVES e DO Ó, 2005).

O ensaio de retenção de água foi realizado com base na norma NBR 13277/05, sendo os valores médios obtidos para retenção de água mostrados na Tabela 4.3. Foram ensaiados 3 corpos de prova para cada teor de substituição; os resultados individuais dos ensaios de retenção de água estão apresentados no Anexo II. A retenção de água é inferior para algumas argamassas com resíduo de vidro, face à argamassa de referência.

Tabela 4.3 - Resultados do ensaio de retenção de água no estado fresco.

Nome	Retenção de água (%)
ACRef	99,28
ACSC10	99,13
ACSC15	99,06
ACSC 20	99,05
ACSA 10	98,89
ACSA 15	98,75
ACSA 20	98,43
ACSC/A 10-10	99,37
ACSC/A 10-15	99,00
ACSC/A 10-20	99,34
ACSC/A 15-10	98,73
ACSC/A 15-15	98,81
ACSC/A 15-20	99,64
ACSC/A 20-10	99,38
ACSC/A 20-15	99,57
ACSC/A 20-20	98,97

Procedeu-se a aplicação da análise de variância (ANOVA) para confirmação das diferenças dos resultados, conforme descrito na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a retenção de água.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F_{tab}	valor-ρ	F crítico	Resultados
Substituição de areia	1,107	3	0,369	3,013	0,044354	2,901	Significativo
Substituição do Cimento	2,083	3	0,694	5,670	0,003125	2,901	Significativo
Interações	14,002	9	1,556	12,706	2,71E-08	2,189	Significativo
NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; F _{cal} = valor calculado para distribuição de Fisher; F _{tab} = valor tabelado para distribuição de Fisher; Valor- ρ = probabilidade de significância							

A análise de variância indicou que o teor de substituição da areia e do cimento pelo resíduo e a interação entre essas duas variáveis influenciaram significativamente os resultados de retenção de água, uma vez que o valor de F_{cal} de cada variável é maior do que o F_{tab} correspondente. Apresentando o ρ -valor menor que 0,05, ou seja, são estatisticamente significativos em nível de confiança de 95%, sendo que a variável mais influente sobre estes resultados foi a interação entre substituição do cimento e da areia concomitantemente, por apresentar o F_{cal} maior dos demais.

Com a substituição da areia pelo resíduo de vidro, aumentou a área superficial dos componentes da mistura, obtendo-se maior índice de retenção de água, contudo, a Figura 4.2 mostra que não houve este aumento, já que com 10% de resíduo houve queda no índice de retenção, e a partir deste valor torna-se crescente a retenção de água na argamassa com 15% de resíduo. Entretanto, a tendência de crescimento seria natural também para a argamassa com 20% de resíduo, pois conforme se aumenta a quantidade de finos nas argamassas, maior é a área superficial dos componentes da mistura, ou seja, maior é a área para que a água livre fique adsorvida nas partículas, mas isso não ocorreu. Sébaibi *et al.* (2003) estudaram argamassas com diferentes tipos de cales e perceberam que a retenção da água não era dependente apenas da área superficial específica, mas também da morfologia dos poros e da natureza química das cales, ou seja, a morfologia dos poros e a natureza química do resíduo influencia a retenção de água na argamassa, como foi observado nos ensaios. A retenção de água apresentou queda quando houve substituição do agregado pelo resíduo de vidro (Figura 4.2).

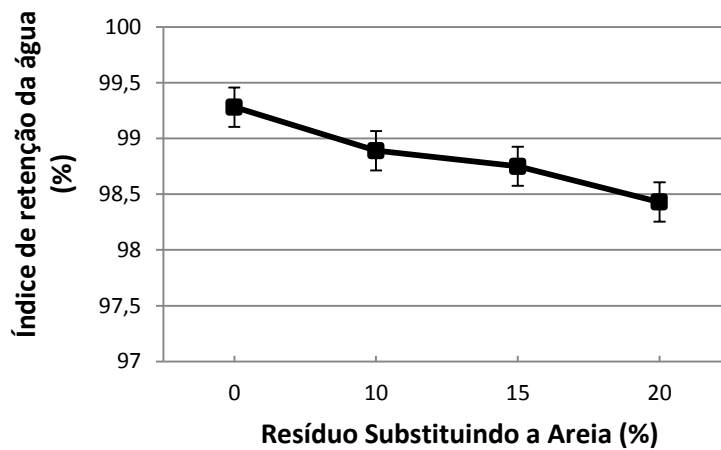


Figura 4.2- Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia.

Como mostra a Figura 4.3, o mesmo ocorreu com as argamassas com substituição de cimento. Ocorreram alterações, com leve diminuição em relação à argamassa de referência. Resultados semelhantes foram observados por Bastos (2007), que acrescentaram partículas finas à mistura (< 75 μm).

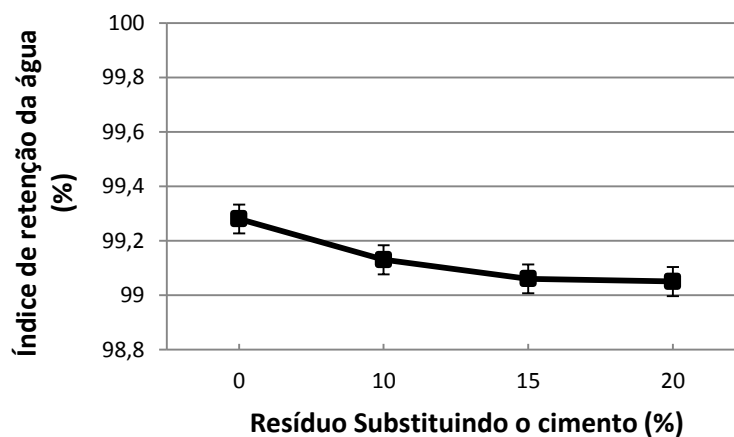


Figura 4.3- Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento.

Após a realização da ANOVA, foi realizado o teste de comparações de médias, que serve como um complemento do teste F, para detectar diferenças entre os tratamentos. O teste utilizado foi o teste de Tukey, pois é um dos testes de comparação de média mais utilizada, por ser bastante rigoroso e de fácil aplicação. Nas Tabelas a seguir mostram o experimento inteiramente casualizado, as médias e medidas.

Tabela 4.5 - Quadro de análise para o teste de Tukey.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal
Tratamentos	17,192	15	1,146	2,656
Resíduo	3,918	32	0,122	
Total	2,110	47		

NOTAS:SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher

Tabela 4.6 – Médias e Medidas.

Médias de tratamento		
ACRef	99,28	ab
ACSC10	97,21	c
ACSC15	99,75	a
ACSC 20	99,06	ab
ACSA 10	98,89	ab
ACSA 15	98,62	ab
ACSA 20	98,43	b
ACSC/A 10-10	99,37	ab
ACSC/A 10-15	99,00	ab
ACSC/A 10-20	99,34	ab
ACSC/A 15-10	98,73	ab
ACSC/A 15-15	98,81	ab
ACSC/A 15-20	99,64	a
ACSC/A 20-10	99,38	ab
ACSC/A 20-15	99,57	a
ACSC/A 20-20	98,97	ab

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. A partir dessa análise pode-se constatar que apenas a argamassa ACSC10 difere de todas as argamassas, uma vez que foi a única que apresentou letra diferente das demais.

4.1.3. Deslizamento

Apesar da utilização do aditivo HEC (hidróxiethyl celulose) que aumenta a plasticidade e a coesão da argamassa evitando o deslizamento da placa cerâmica, foi possível observar alterações no deslizamento dos traços, como mostra a Figura 4.4.

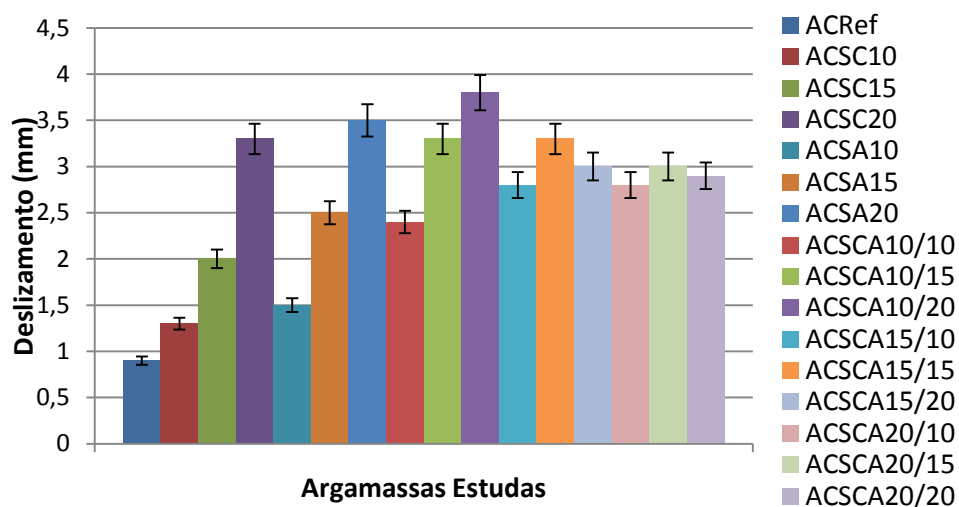


Figura 4.4 – Resultados individuais de deslizamento

Observa-se que nenhuma das argamassas estudadas teve deslizamento inferior à de referência. Além disso, nota-se que a argamassa ACSCA10/20 apresentou maior deslizamento. Este resultado já era esperado, uma vez que apresentou maior teor de ar incorporado, ou seja, mais fluida em relação às demais. Já a argamassa ACSC10 apresentou menor deslizamento, em função do teor de ar incorporado desta.

4.1.4. Squeeze flow

A caracterização reológica de argamassas no estado fresco foi determinada de acordo com NBR 15839 (ABNT, 2010). Os resultados dos ensaios de acordo com o escoamento do material decorrente da aplicação de uma carga de compressão sobre os corpos de prova no estado fresco, são mostrados nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9.

Através das curvas de carga aplicada versus deslocamento torna-se possível obter a carga máxima de compressão de cada argamassa para o deslocamento máximo do pistão do equipamento (fixado em 3 mm). Cargas de compressão altas indicam argamassas com maior viscosidade, já que foi necessário aplicar carga maior para se obter um mesmo deslocamento. Cargas de compressão baixas indicam, por sua vez, argamassa com menor viscosidade.

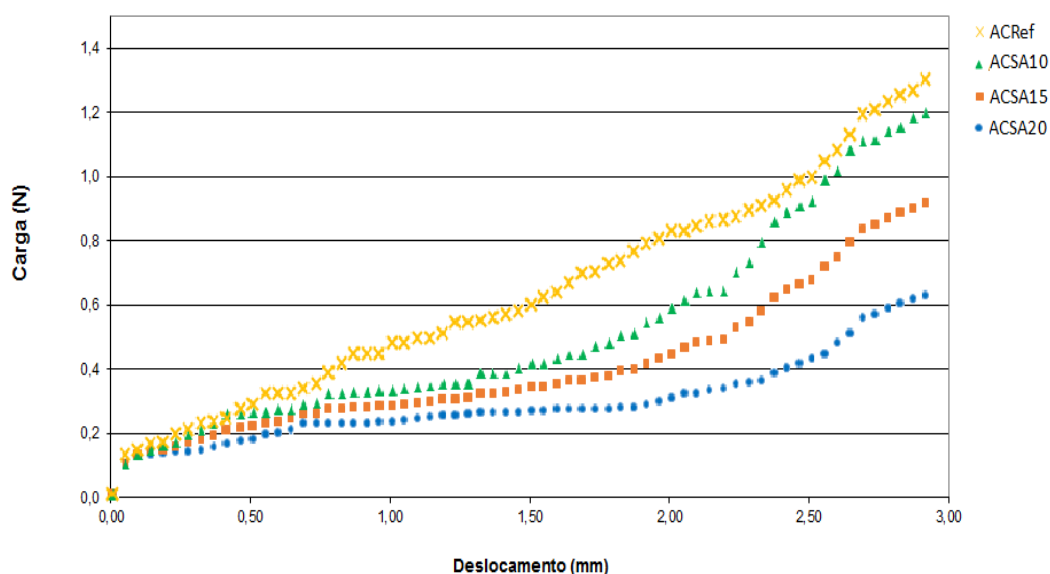


Figura 4.5– Curvas carga versus deslocamento obtidas no ensaio *squeeze flow* das argamassas com percentual de resíduo na areia.

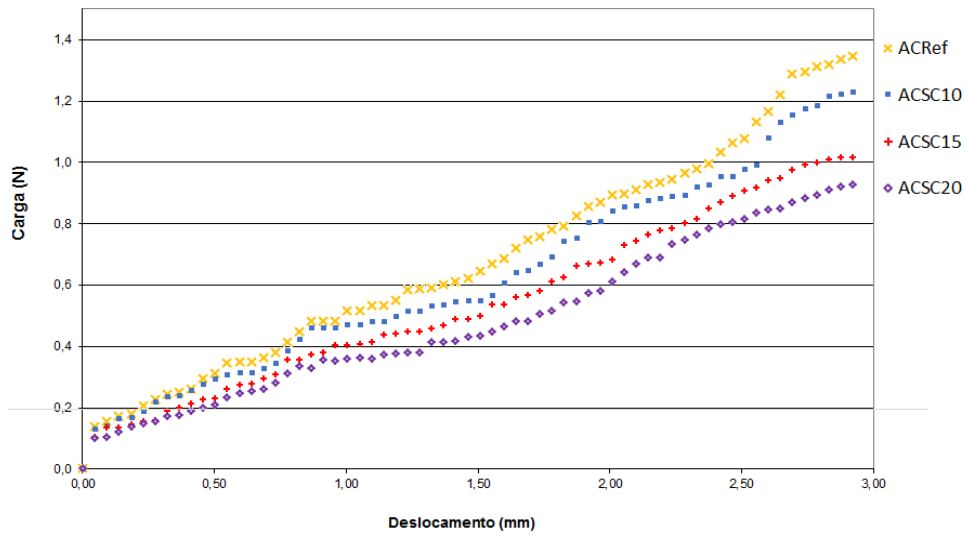


Figura 4.6 – Curvas carga versus deslocamento obtidas no ensaio *squeeze flow* das argamassas com percentual de resíduo na areia.

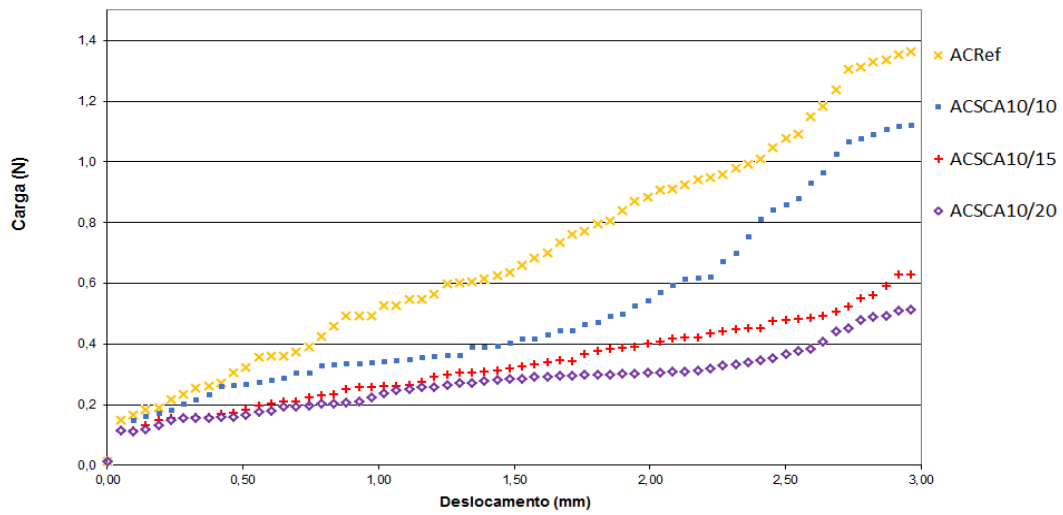


Figura 4.7 – Curvas carga versus deslocamento obtidas no ensaio *squeeze flow* das argamassas com percentual de resíduo na areia e 10% de resíduo no cimento.

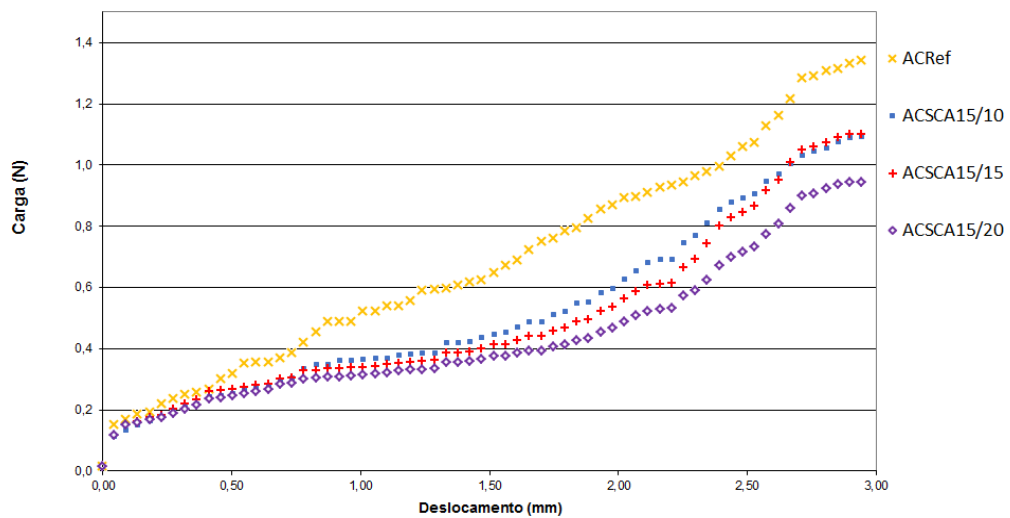


Figura 4.8 – Curvas carga versus deslocamento obtidas no ensaio *squeeze flow* das argamassas com percentual de resíduo na areia e 15% de resíduo no cimento.

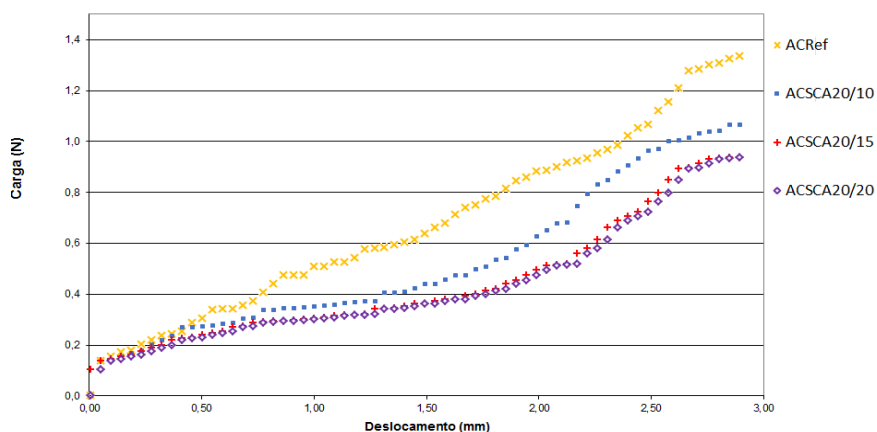


Figura 4.9 – Curvas carga versus deslocamento obtidas no ensaio *squeeze flow* das argamassas com percentual de resíduo na areia e 20% de resíduo no cimento.

Os resultados demonstram que as argamassas colantes apresentaram características reológicas diferentes, pois cada argamassa mostrou capacidade distinta de absorção do carregamento de compressão, sendo que nenhuma obteve carga de compressão maior do que a argamassa de referência. Porém, observa-se que a argamassa ACSCA10 foi a que apresentou maior carga de compressão em relação às argamassas modificadas, consequentemente a maior viscosidade entre todas. A argamassa ACSCA10/20, por sua vez, foi a que apresentou a menor carga de compressão e, consequentemente, a menor viscosidade.

O teor de ar incorporado exerce substancial influência no comportamento da mistura. As argamassas com baixos teores de ar incorporado possuem consistência mais densa, que podem reduzir a produtividade de aplicação do material. Já o excesso de ar incorporado pode afetar tanto as características reológicas, quanto o excesso de fluidez devido ao grande número de poros, ocasionando, também, queda na resistência mecânica.

4.2. Ensaios realizados nas argamassas no estado endurecido

No estado endurecido foram verificadas propriedades consideradas importantes para garantir um bom desempenho ao longo da vida útil das argamassas colantes, tais como de resistência de aderência à tração e tempo em aberto. Os resultados obtidos nesses ensaios, bem como as análises estatísticas realizadas, são apresentados e discutidos a seguir.

4.2.1. Resistência de aderência à tração

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

A Figura 4.10 mostra os resultados médios de resistência de aderência à tração das argamassas. Vale ressaltar que, de acordo com a NBR 14081-1/12, as argamassas colantes devem ter no mínimo resistência de aderência à tração igual a 0,5 MPa aos 28 dias.

As argamassas com substituição de cimento e/ou areia por resíduo de vidro, em geral, obtiveram resultados de resistência inferiores à argamassa referência, na cura normal e em estufa. Entretanto, parte das argamassas pode ser considerada argamassa colante de acordo com a NBR 14081-4/12, atingindo resultados superiores a 0,5 MPa. Estes resultados condizem com os estudos feitos por Panacho (2012) em que o aumento da incorporação de resíduo de vidro reduz a aderência da argamassa.

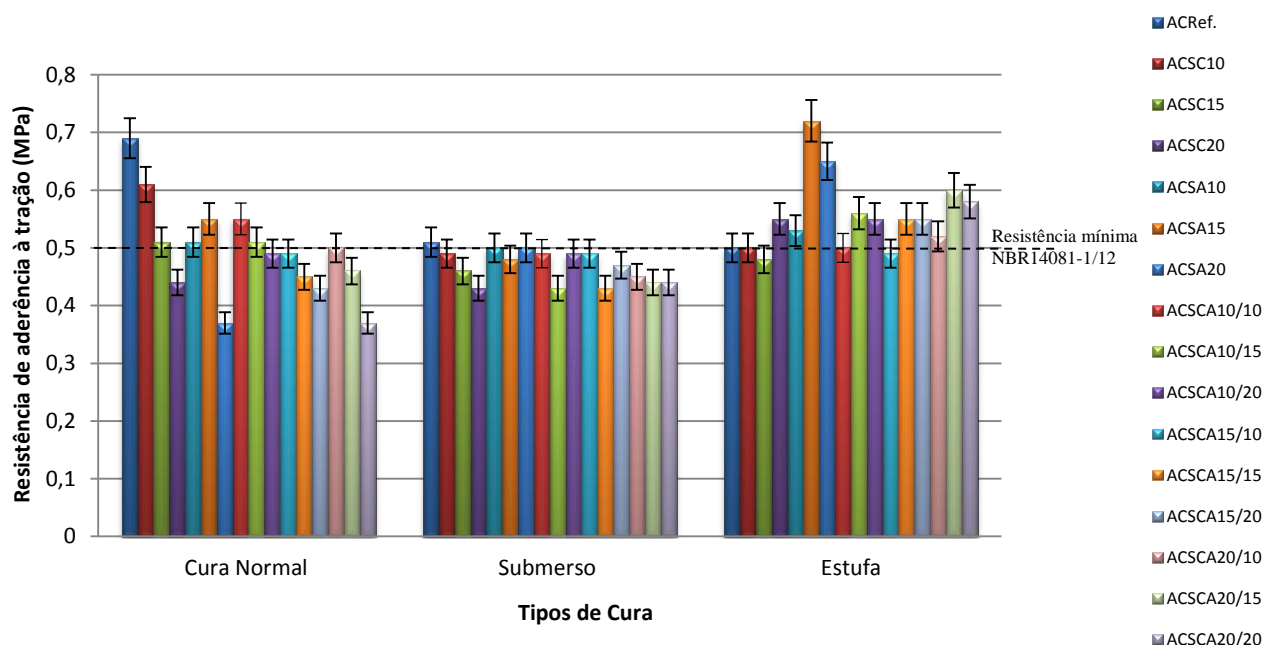


Figura 4.10 - Resistência de aderência à tração

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Os resultados da análise de variância, da argamassa em cura normal são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração, sob cura normal.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	valor-ρ	Ftab	Resultado
Substituição de areia	1,395	3	0,465	67,431	3,32E-36	2,624	Significativo
Substituição do cimento	0,863	3	0,288	41,717	6,96E-24	2,624	Significativo
Interações	0,859	9	0,096	13,849	8,29E-20	1,900	Significativo
NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher; Ftab = valor tabelado para distribuição de Fisher; Valor- ρ = probabilidade de significância							

De acordo com a Tabela 4.7, o teor de substituição de areia, o teor de substituição de cimento e a interação entre essas duas variáveis são estatisticamente significativos, sob cura normal, uma vez que o valor de Fcal de cada variável é maior do que o Ftab correspondente. Além disso, apresentaram o ρ -valor menor do que 0,05, ou seja, são estatisticamente significativas em um nível de confiança de 95%. Isto quer dizer que cada uma dessas variáveis independentes, tomadas isoladamente, exercem influência na resistência de aderência à tração.

Importante consideração sobre este aspecto diz respeito à intensidade de influência dos fatores. 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 de aderência à tração foi o teor de substituição de areia, sendo o percentual de substituição do cimento influência secundária, embora significativo. A interação entre os fatores controláveis, apesar de também ser significativa, é o fator de menor influência.

A distribuição estatística da resistência de aderência à tração em função das variáveis isoladas, teor de substituição de areia e substituição de cimento, por resíduo de vidro, sob cura normal, são mostradas nas Figuras 4.11 e 4.12. O efeito da interação destas variáveis sobre a resistência de aderência à tração está na figura 4.13.

É possível verificar na Figura 4.11 a tendência de diminuição da resistência de aderência à tração com o aumento do teor de resíduo na substituição de areia. Como o resíduo substituído apresenta granulometria

igual da areia e a partir da revisão bibliográfica feita, mostrou que resíduo com dimensão maior causa expansão diminuindo a resistência de aderência.

Esses resultados são similares da pesquisa de Serpa *et al.* (2008), Limbachiya (2009), Kou e Poon (2009) no que refere à resistência com substituição de agregado miúdo.

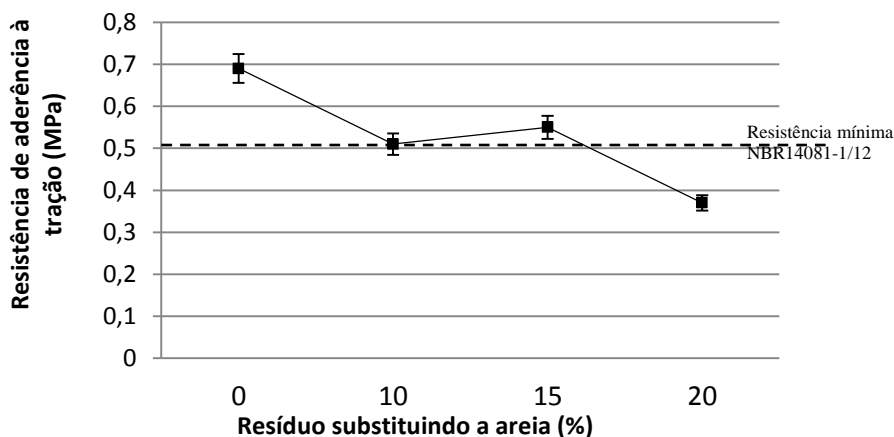


Figura 4.11– Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração.

A Figura 4.12 mostra uma tendência de queda da resistência de aderência à tração das argamassas com incorporação do resíduo de vidro, sobretudo para ACSC 20 (argamassa colante com 20% de substituição do cimento por resíduo de vidro) que apresentou o menor valor de resistência de aderência à tração.

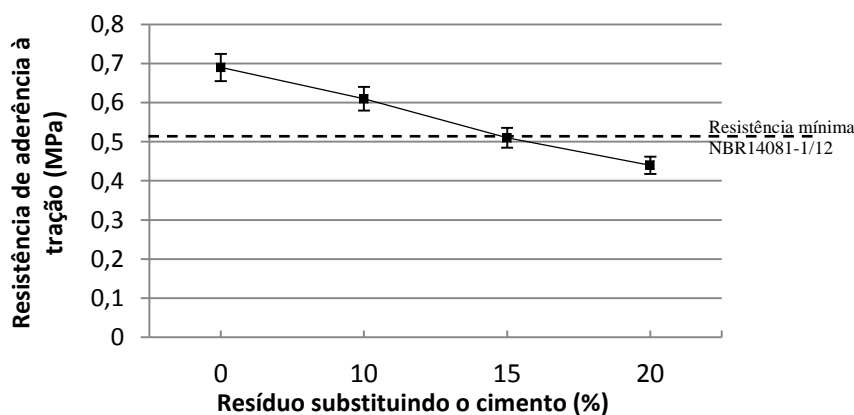


Figura 4.12– Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração.

Estes resultados corroboram os encontrados por Khmiri, Samet *et al.* (2012), em que as argamassas com incorporação de resíduo de vidro apresentaram valores inferiores aos da argamassa de referência, porém, ainda sim, satisfatórios. As argamassas com maiores teores de substituição de resíduo de vidro, em geral, apresentaram valores menores de resistência. Aqueles pesquisadores também associam os resultados à ocorrência da RAS.

A Figura 4.13 apresenta a interação entre os fatores percentual de substituição de areia e percentual de substituição do cimento sobre a resistência de aderência à tração. Com relação à estas interações observa-se que nenhuma das argamassas com substituição atingiu valores superiores aos da argamassa de referência. Essa queda de resistência pode ser explicada pela possível produção do gel alcalino formado devido à RAS. No entanto, a argamassa com substituição de 10% em massa da areia e 10% em massa do cimento pelo resíduo de vidro, mesmo tendo resistência de aderência à tração de cerca de 20% inferior ao da argamassa de referência, atende aos critérios da NBR 14081-4/12 no que tange à resistência de aderência à tração aos 28 dias. Outro resultado satisfatório é o da argamassa com substituição de 15% em massa da areia e 10% em massa do cimento pelo resíduo.

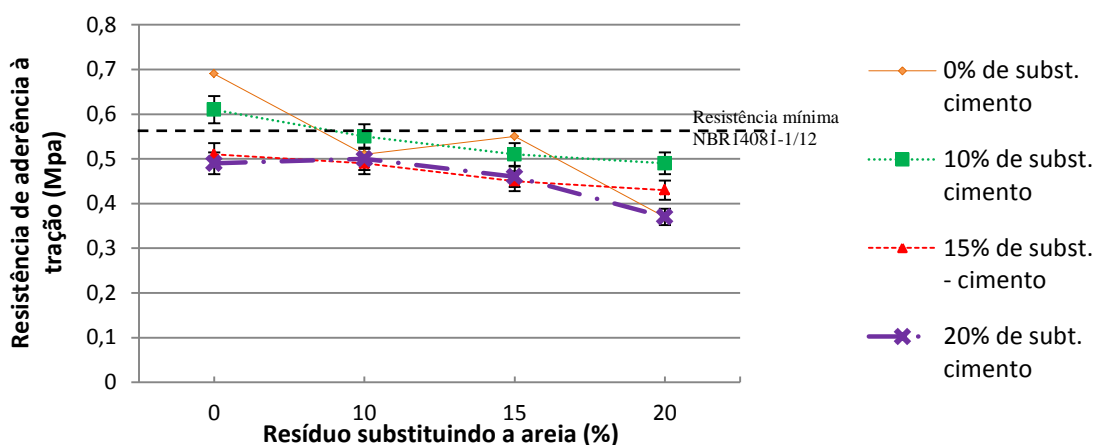


Figura 4.13 – Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração.

Para detectar diferenças entre as substituições feitas na argamassa colante utilizando o resíduo de vidro, utilizou o teste de Tukey, uma vez que todos os resultados apresentaram significância ao nível de 5% de probabilidade. Os dados das análises são mostrado nas Tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8 - Quadro de análise para o teste de Tukey, sob cura normal.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcal</i>
Tratamentos	3,095	15	0,2063	29,873
Resíduo	3,205	464	0,0069	
Total	6,300	479		

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher.

A partir dos resultados do teste de Tukey foi possível encontrar diferença significativa nas argamassas produzidas. Observou que a argamassa ACSC10 não difere estatisticamente das argamassas ACSA15 e a ACSC/A 10-15, porém difere das demais argamassas, assim como a argamassa ACSC/A 15-20 não difere estatisticamente das argamassas ACSC/A 20-15 e a ACSC/A20-20, mas apresenta diferença estatística das outras argamassas.

Tabela 4.9 – Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura normal.

Médias de tratamento		
ACRef	0,693	a
ACSC10	0,612	b
ACSC15	0,51	cde
ACSC 20	0,442	efg
ACSA 10	0,519	cd
ACSA 15	0,554	bc
ACSA 20	0,493	cdef
ACSC/A 10-10	0,503	cdef
ACSC/A 10-15	0,553	bc
ACSC/A 10-20	0,507	cdef
ACSC/A 15-10	0,457	def
ACSC/A 15-15	0,447	def
ACSC/A 15-20	0,365	h
ACSC/A 20-10	0,494	cdef
ACSC/A 20-15	0,431	fgh
ACSC/A 20-20	0,372	gh

Visando investigar a efetiva influência do percentual de substituição areia e cimento pelo resíduo de vidro na resistência de aderência à tração das argamassas, sob cura em estufa, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

Tabela 4.10 - ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	valor-ρ	Ftab	Resultado
Substituição de areia	0,773	3	0,258	23,361	4,24E-14	2,624	Significativo
Substituição do cimento	0,429	3	0,143	12,961	3,83E-08	2,624	Significativo
Interações	0,541	9	0,060	5,444	4,05E-07	1,900	Significativo

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher; Ftab = valor tabelado para distribuição de Fisher; Valor- ρ = probabilidade de significância.

Constata-se que o teor de substituição dos materiais é significativo para a resistência em um nível de confiança de 95%, já que o valor de Fcal é maior do que o de Ftab.

A cura em estufa procura avaliar o efeito da temperatura sobre o conjunto substrato/argamassa/placa cerâmica. Vale ressaltar que este tipo de cura não se aplica à argamassa do tipo ACI.

Pode-se verificar que todas as argamassas obtiveram desempenho superior à argamassa de referência quando expostas à temperatura de cura de 70°C durante 14 dias.

A Figura 4.14 mostra o comportamento das argamassas com percentuais de substituição da areia. É possível observar que o desempenho da argamassa com substituição de 15% da areia em massa por resíduo destaca-se por apresentar valor superior aos outros.

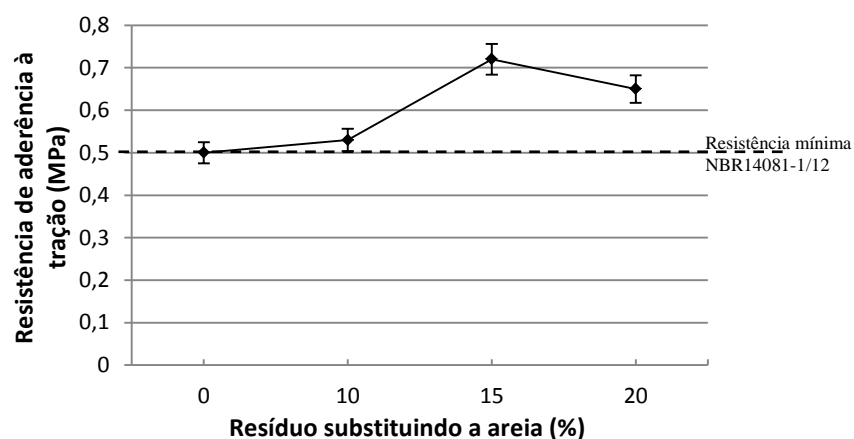


Figura 4.14– Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa

A Figura 4.15 mostra o aumento da resistência de aderência à tração apenas quando substituiu 20% do cimento para cura a 70°C durante 14 dias, diferente da cura normal que não apresentou ganho de resistência em nenhuma substituição.

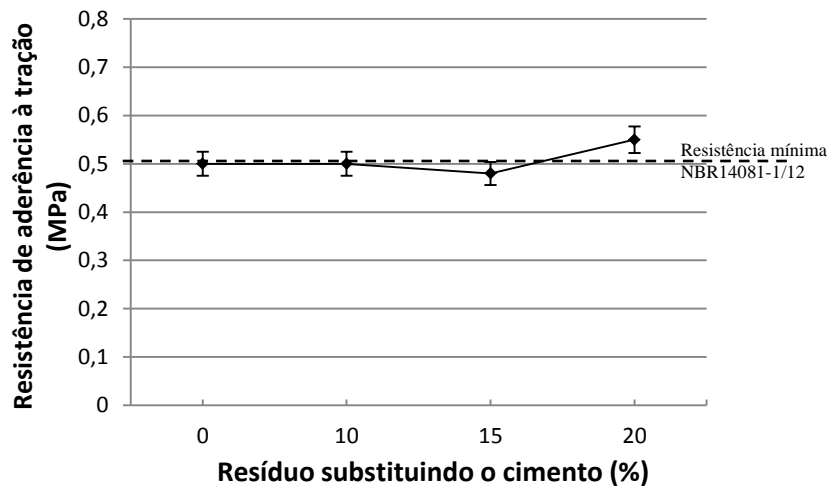


Figura 4.15– Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa

Pode-se observar que a temperatura de cura influenciou na resistência das argamassas, pois influencia a atividade pozolânica do pó de vidro.

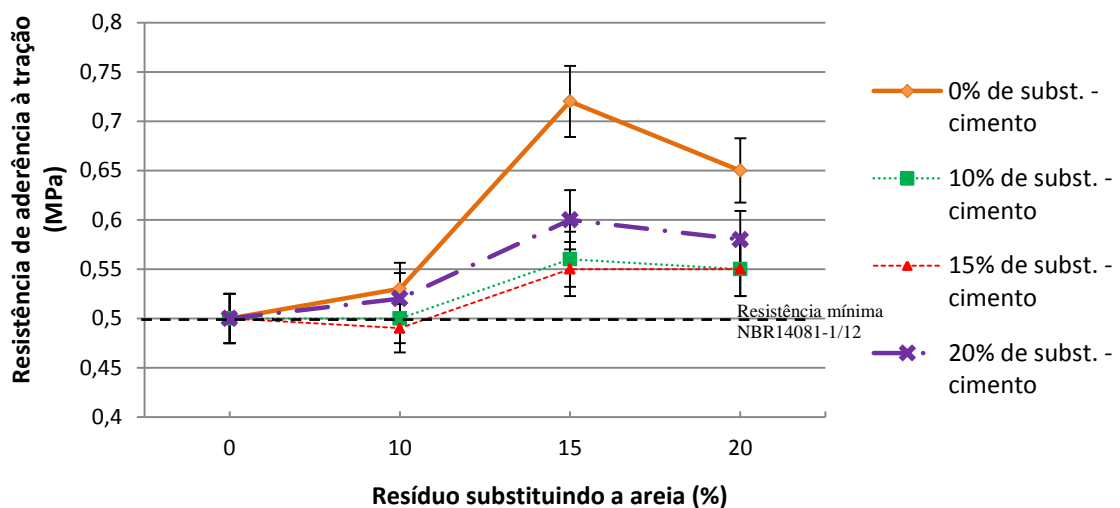


Figura 4.16– Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração sob cura em estufa.

Pode-se verificar que as argamassas com percentual de substituição de cimento de 10% e 15% tiveram comportamento semelhante ao percentual de substituição de cimento e areia. A argamassa com o percentual de substituição de 20% de cimento e 15% de areia obteve a melhor resistência.

A argamassa ACSC/A 10-15, quando submetidas à cura em estufa, não apresentou estatisticamente uma diferença significativa das argamassas ACSC/A 15-20 e ACSC/A 20-10, como foi observado nos resultados do teste de Tukey apresentados nas Tabelas 4.11 e 4.12. Assim com a argamassa ACSC 20 não apresentou diferença estatística das demais argamassas, exceto às argamassas citadas acima além da ACSC/A 20-20.

Tabela 4.11 - Quadro de análise para o teste de Tukey, sob cura em estufa.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcal</i>
Tratamentos	2,039	15	0,136	12,257
Resíduo	5,147	464	0,011	
Total	7,187	479		

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher.

Tabela 4.12 – Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura em estufa.

Médias de tratamento		
ACRef	0,499	cd
ACSC10	0,500	cd
ACSC15	0,549	cd
ACSC 20	0,476	d
ACSA 10	0,529	cd
ACSA 15	0,499	cd
ACSA 20	0,487	d
ACSC/A 10-10	0,524	cd
ACSC/A 10-15	0,720	a
ACSC/A 10-20	0,555	cd
ACSC/A 15-10	0,547	cd
ACSC/A 15-15	0,547	cd
ACSC/A 15-20	0,649	ab
ACSC/A 20-10	0,649	ab
ACSC/A 20-15	0,552	cd
ACSC/A 20-20	0,585	bc

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência de aderência à tração na condição de cura submersa foram submetidos à análise de variância. A ANOVA indicou que o teor de substituição de cimento e da areia por resíduo de vidro e a interação entre essas duas variáveis influenciaram significativamente os resultados de resistência de aderência à tração, sendo que a variável mais influente sobre estes resultados foi, mais uma vez, a substituição de areia. Os resultados obtidos na análise de variância são mostrados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13- ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração, sob cura submersa.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcal</i>	<i>valor-ρ</i>	<i>Ftab</i>	<i>Resultado</i>
<i>Substituição de areia</i>	0,287	3	0,096	22,978	7,04E-14	2,624	Significativo
<i>Substituição de cimento</i>	0,131	3	0,044	10,488	1,1E-06	2,624	Significativo
<i>Interações</i>	0,088	9	0,009	2,349	0,013436	1,900	Significativo

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher; Ftab = valor tabelado para distribuição de Fisher; valor-ρ = probabilidade de significância

Pode-se verificar nas Figuras 4.17 e 4.18 que as argamassas tiveram os piores desempenhos sob este tipo de cura, obtendo resistência inferior à argamassa de referência. Há queda significativa de resistência da argamassa com teor de 20% de substituição da areia, com valores abaixo do limite de resistência de aderência para argamassa colante definida pela NBR 14081/12.

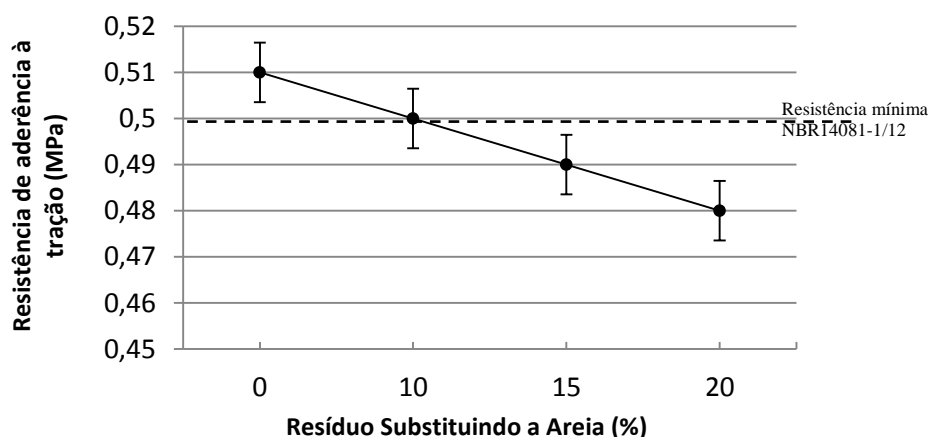


Figura 4.17- Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração sob cura submersa

A Figura 4.18 mostra que há uma tendência de diminuição da resistência com o aumento do percentual de substituição do cimento.

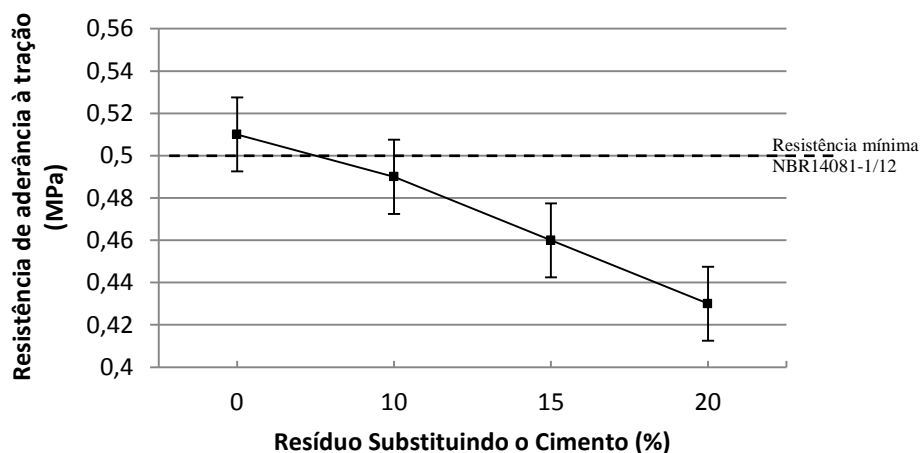


Figura 4.18– Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento sobre a resistência de aderência à tração sob cura submersa

Verifica-se que estas argamassas são mais vulneráveis à presença de água, pois apresentaram decréscimo considerável de resistências como mostra a figura 4.19. Essa queda está relacionada com o aumento da porosidade que a argamassa apresentou no final da cura, devido à lixiviação do Na_2O , presente no resíduo, fez com que a argamassa ficasse esbranquiçada.

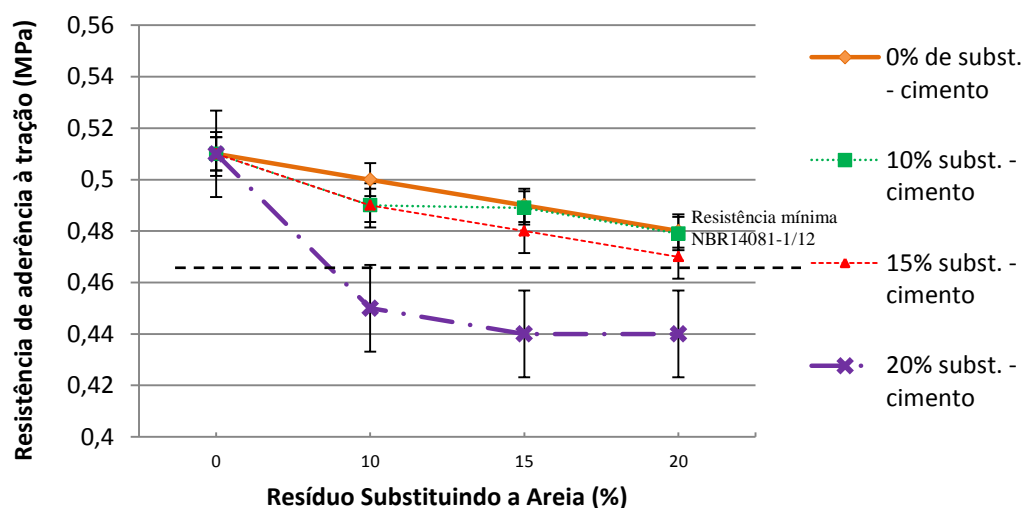


Figura 4.19– Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração, sob cura submersa.

Como podem ser observados a partir dos resultados do teste de Tukey, as argamassas ACSC/A 10-15, ACSC/A 10-20, ACSC/A 15-10 e ACSC/A 15-

15 não apresentaram estatisticamente, diferença entre si, assim como as argamassas ACSA 10, ACSA 15 e ACSC/A 15-20 também não apresentaram diferença estatística entre si. A Tabela 4.14 e 4.15 mostram os resultados obtidos no teste de Tukey.

Tabela 4.14 - Quadro de análise para o teste de Tukey, sob cura submersa.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcal</i>
Tratamentos	0,508	15	0,034	7,894
Resíduo	1,991	464	0,0043	
Total	2,499	479		

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher

Tabela 4.15 – Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura submersa.

Médias de tratamento		
ACRef	0,507	a
ACSC10	0,489	ab
ACSC15	0,462	abc
ACSC 20	0,433	bc
ACSA 10	0,504	a
ACSA 15	0,497	a
ACSA 20	0,488	ab
ACSC/A 10-10	0,453	abc
ACSC/A 10-15	0,407	c
ACSC/A 10-20	0,426	c
ACSC/A 15-10	0,427	c
ACSC/A 15-15	0,427	c
ACSC/A 15-20	0,496	a
ACSC/A 20-10	0,490	ab
ACSC/A 20-15	0,464	abc
ACSC/A 20-20	0,432	bc

4.2.2. Resistência de aderência à tração do tempo em aberto

Visando associar o comportamento das argamassas nos estados frescos e endurecido, foi realizado o ensaio de tempo em aberto para as argamassas

colante sobre substrato padrão normalizado pela NBR 14081-3/12. Este ensaio avalia a eficiência da argamassa em manter-se aplicável após um período de tempo. A Figura 4.20 mostra a média de resistência da argamassa em tempo em aberto.

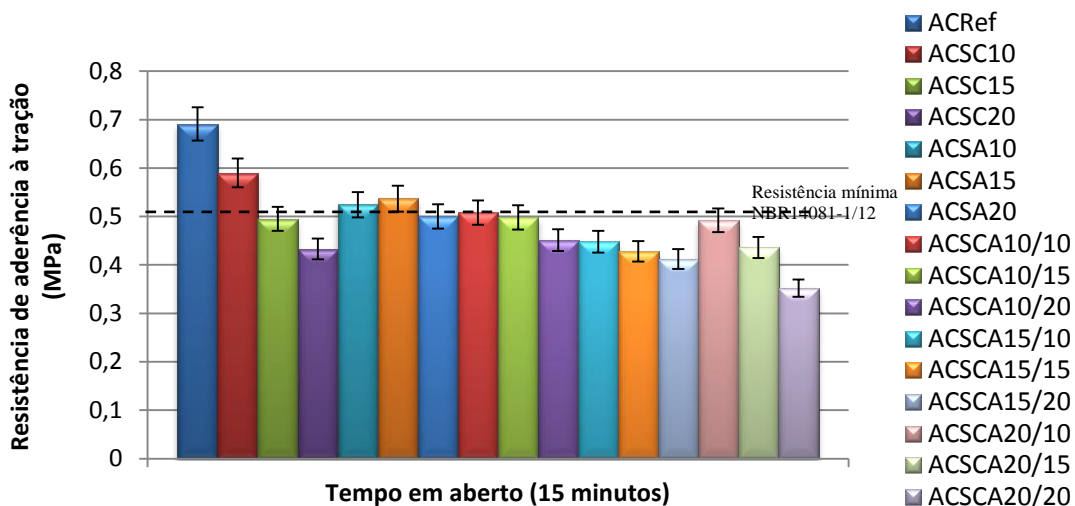


Figura 4.20 - Resistência de aderência à tração (tempo em aberto - 15 minutos).

Os ensaios anteriores, os resultados obtidos nos ensaios de tempo em aberto foram submetidos à análise de variância. Pela ANOVA verificou-se que o teor de substituição de cimento e da areia por resíduo de vidro e a interação entre essas duas variáveis influenciaram significativamente os resultados, como mostra a Tabela 4.16. A sequência de cálculos da análise de variância está detalhada no ANEXO XXI.

Tabela 4.16 - ANOVA do efeito do percentual de resíduo sobre a resistência de aderência à tração - tempo em aberto.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	Fcal	valor- ρ	Ftab	Resultados
Substituição de areia	0,537	3	0,179	86,872	3,842E-32	2,667	Significativo
Substituição do cimento	0,565	3	0,188	91,445	3,514E-33	2,667	Significativo
Interações	0,308	9	0,0343	16,634	1,549E-18	1,945	Significativo

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher; Ftab = valor tabelado para distribuição de Fisher; valor- ρ = probabilidade de significância

A variável mais influente sobre os resultados foi a substituição de cimento, uma vez que o parâmetro de Fisher foi o maior comparado com a substituição de areia e a interação entre os mesmos.

A argamassa com 10% de resíduo substituindo o cimento foi a mistura que apresentou os maiores valores de tempo em aberto. Este resultado já era esperado, pois, ao observar os resultados obtidos anteriormente, soba cura normal, esta argamassa apresentou desempenho superior às demais.

Na Figura 4.21 nota-se um comportamento similar da argamassa com 15% de substituição da areia em relação aos obtidos na cura normal.

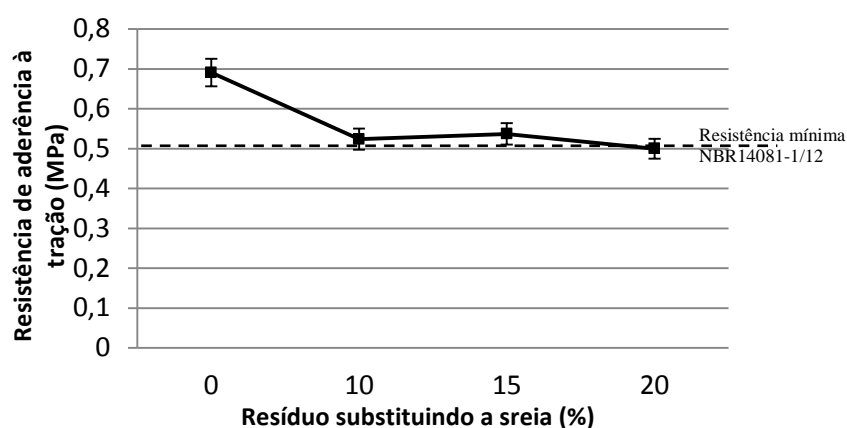


Figura 4.21 - Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo a areia sobre a resistência de aderência à tração em tempo em aberto

A Figura 4.22 mostra influência do resíduo em substituição do cimento na diminuição da resistência de aderência à tração nos corpos de prova. Os bons resultados nos ensaios de retenção de água não foram suficientes para manter a resistência.

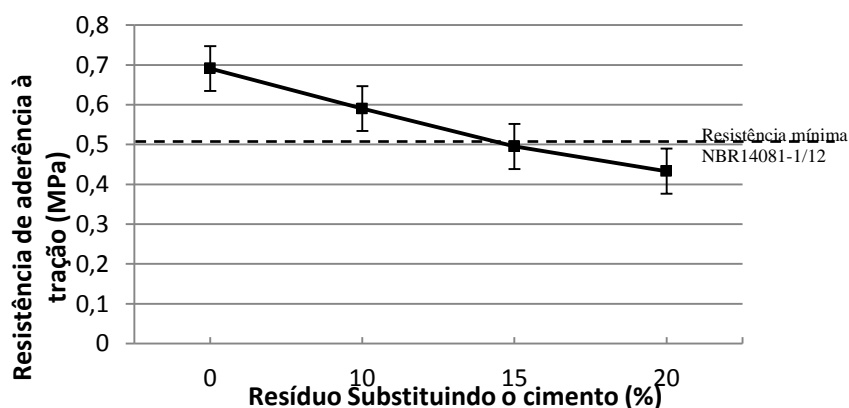


Figura 4.22 - Efeito causado pelo do resíduo quando substituindo o cimento sobre a resistência de aderência à tração em tempo em aberto

Na Figura 4.23 tem-se a interação da resistência de aderência à tração com tempo em aberto de 15 minutos e os fatores controláveis. Embora o percentual de substituição de areia influencie diretamente a resistência de aderência à tração, é a substituição de areia, o fator de maior influência, visto que, mesmo com aditivos de retenção de água nas argamassas, a resistência apresentou queda para todas as argamassas.

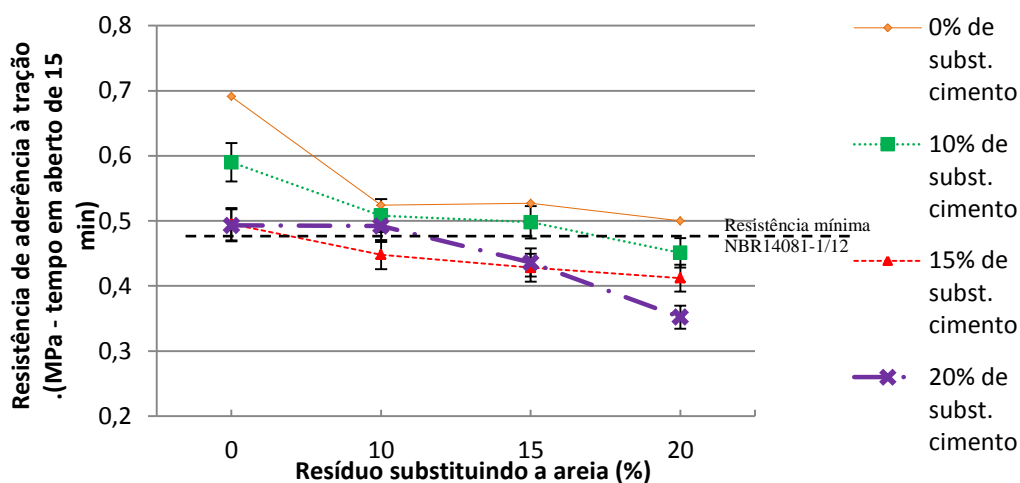


Figure 4.23 – Efeito da interação causado pelo do resíduo quando substitui a areia e o cimento concomitantemente sobre a resistência de aderência à tração em o tempo em aberto.

Assim como nos ensaios de resistência de aderência à tração aos 28 dias, para os três tipos de cura, foram feitos o teste de Tukey, nos resultados deste ensaio de resistência aderência à tração também foi aplicado o teste para determina se as argamassas apresentam diferenças estatísticas para este ensaio.

Tabela 4.17 - Quadro de análise para o teste de Tukey.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>Fcal</i>
Tratamentos	1,419	15	0,0946	45,862
Resíduo	0,297	144	0,00206	
Total	1,716	159		

NOTAS: SQ = soma dos quadrados; gl = grau de liberdade; MQ = média dos quadrados; Fcal = valor calculado para distribuição de Fisher

Conforme resultado mostrado na Tabela 4.18, constatou-se que as argamassas ACRref e ACSC10 não apresentarão diferenças estatísticas entre si, entretanto as mesma apresentam diferenças estáticas das demais

argamassas ensaiadas. O mesmo pode-se dizer da argamassa ACSC/A 20-20 que não apresenta diferença estatística da argamassa ACSC/A 20-15, porém o resultado mostra diferença das demais argamassas, uma vez que as médias seguidas pelo menos uma mesma letra, não difere entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 4.18 – Médias e Medidas das resistências de aderência à tração sob cura submersa.

Médias de tratamento		
ACRef	0,684	a
ACSC10	0,741	a
ACSC15	0,496	bcde
ACSC 20	0,434	def
ACSA 10	0,525	b
ACSA 15	0,509	bc
ACSA 20	0,448	cdef
ACSC/A 10-10	0,492	bcde
ACSC/A 10-15	0,538	b
ACSC/A 10-20	0,499	bcde
ACSC/A 15-10	0,430	ef
ACSC/A 15-15	0,436	def
ACSC/A 15-20	0,501	bcd
ACSC/A 20-10	0,451	cdef
ACSC/A 20-15	0,413	fg
ACSC/A 20-20	0,352	g

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse capítulo serão apresentadas as conclusões com base nos resultados obtidos e sugeridos estudos futuros sobre o tema.

5.1 Conclusão geral

Com o propósito de avaliar a influencia do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante, foram realizados ensaios e observou-se que a substituição parcial do cimento e do agregado miúdo pelo resíduo de vidro nas proporções de 0, 10, 15 e 20% nas argamassas colantes não produziu melhoria considerável nas propriedades analisadas. Entretanto, alguns traços também não tiveram perdas significativas nas propriedades físicas e mecânicas em relação à referência.

Realizadas as comparações e a análise da influência das variáveis estudadas, sendo elas: a substituição do cimento, a substituição da areia e a substituição concomitantemente do cimento e da areia pelo resíduo de vidro, pode-se concluir que:

- o resíduo de vidro apresentou atividade pozolânica considerável de acordo com sua composição física e química, uma vez que o índice de atividade pozolânica foi de 79,7%;
- o resíduo de vidro influenciou no aumento do teor de ar incorporado, o que dificultou a compacidade das argamassas;
- à medida que aumentou o teor de substituição dos matérias pelo resíduo de vidro, verificou a diminuição da consistência;
- a granulometria do vidro influencia na resistência de aderência à tração;
- A substituição concomitante do cimento e da areia influenciou a resistência das argamassas, sob cura normal, uma vez que nenhuma atingiu a resistência de aderência à tração imposta pela NBR 14081-1/12;
- O aumento da temperatura de cura resultou num ganho de resistência das argamassas com elevados teores de substituição;

- No final do tempo de cura submersa das argamassas observou-se que a mesma ficou mais porosa e esbranquiçada devido à lixiviação de componentes do resíduo;
- Nenhuma argamassa, sob cura submersa, atingiu a resistência mínima de aderência de 0,5 Mpa imposta pela NBR 14081-1/12.

5.2 Sugestões para estudos futuros

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa são sugeridos estudos futuros visando entender o comportamento do resíduo de vidro em matrizes cimentícias, especialmente em argamassas colantes, a saber:

- análise de faixas granulométricas mais finas que a utilizada nesta pesquisa, principalmente de resíduo de vidro ultrafino;
- análise do resíduo como adição, ao invés de substituição, em baixos percentuais em argamassas colantes;
- análise da relação água/resíduo de vidro;
- análise da condutividade térmica e do coeficiente de dilatação térmica das argamassas com incorporação de resíduo de vidro;
- análise de parâmetros relativos à durabilidade das argamassas produzidas com este resíduo, tais como permeabilidade a cloretos, resistência a sulfatos e carbonatação;
- investigação de reações expansivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5733 - **Cimento Portland de alta resistência inicial**. 5 páginas. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT NBR 5752 – **Materiais pozolânicos – Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento**. 4 páginas. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT NBR 7211 - **Agregados para concreto**. 9 páginas. São Paulo, 2009.

ABNT NBR 12653 - **Materiais pozolânicos - Requisitos**. 6 páginas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 13276 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. 3 páginas. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 13277 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água**, 3 páginas. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 13278 - **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**, 4 páginas. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT NBR 15839 - **Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow***, 6 páginas. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 16372 - **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**, 11 páginas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 14081-1 - **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 1: Requisitos**, 5 páginas. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 14081-2 - **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 2: Execução do substrato-**

padrão e aplicação da argamassa para ensaios, 9 páginas. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT NBR 14081-3 - **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 3: Determinação do tempo em aberto**, 7 páginas. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 14081-4 - **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 4: Determinação a resistência de aderência à tração**, 8 páginas. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 14081-5 - **Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas – Parte 5: Determinação do deslizamento**, 6 páginas. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR NM 23 - **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**, 5 páginas. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR NM 52 - **Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente**, 6 páginas. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT NBR NM 248 – **Agregados - Determinação da composição granulométrica**, 6 páginas. Rio de Janeiro, 2003.

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro. **ANUÁRIO ABIVIDRO 2008**. Disponível em: <www.abividro.org.br>. Acesso em: janeiro 2015.

AKERMAN, M. Introdução ao Vidro e Sua Produção. **CERTEV**, 2015. Disponível em: <<http://www.certev.ufscar.br>>. Acesso em: 22 set. 2015.

ANTONIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodocálcico 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.

ASTM. **Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride**. 2012. 8 p.

- BABU, K. G.; PRAKASH, P. V. S. **Efficiency of silica fume on concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 25, n.6, 1995, pg.1273-1283.
- BARDINI, I. S.; MARCHIORO, T. B. **Um estudo exploratório do uso de vidro reciclado como agregado de concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2007.
- BARROSO, T. R. **Estudo da atividade pozolânica e da aplicação em concreto de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar com diferentes características físicas e químicas.** Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2011, pg.86-94
- BAUER, E. Revestimento de argamassa – **características e peculiaridade.** *Brasília*, n. 1, 2005, pg.7-13.
- CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINI, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa,** n. Anais IV SBTA, Brasília – DF, 2001, pg.44-49.
- CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico,** São Paulo, 2009. 158pg.
- CARDOSO, F.; PILEGGI, R. G.; JHON, V. M. **Caracterização Reológica de Argamassa pelo Método de Squeeze Flow,** Florianópolis, 2005, pg.121-143.
- CINCOTTO, M. A. **Aglomerantes de Argamassas e Concreto,** IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 2008, 118p.
- COLLINS, C. L. E. A. School of Civil and Environmental Engineering; Georgia Institute of Technology. **School of Civil and Environmental Engineering.** Disponível em: <www.ce.gatech.edu>. Acesso em: 18 novembro 2015.
- COMLURB. Gerência de Pesquisas aplicadas – **Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos** -2009
- CORDEIRO, G. C. . **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concreto,** 2006.pg.326-370
- CORINALDESI, V. GNAPPI, G., MORICONI, G MONTEIRO A. **Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars.** *Waste Management*, v. 25, 2005. 197-201 p.
- COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parametros reológicos.** São Paulo, v. Tese(Doutorado), 2006, pg190-200.
- DU, H.; TAN, K. H. A. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement and Concrete Composites**, 35, 2013.pg. 109-117.

- FEDERAL, G. **Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não Metálicos**. Ministério de Minas e Energia. 2012, pg.59-66.
- FIORITO, A. J. S. I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. PINI, São Paulo, p. 221, 1994.
- GROOT, C. J. W. P. Aspect of mortar – brick on. **INTERNATIONAL BRICKLAND BLOCK MASONRY CONFERENCE**, 1998, pg.175-181.
- HEC, U. C. C. **Versatilidade para a construção civil: aplicação em argamassas adesivas**. Boletim técnico da escolca Politécnica da USP,pg17, 1997.
- IDIR, R.; CYR, M. A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**. 2012, pg. 1309-1312.
- 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 a 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.
- KARAMBERI A, MOUTSATSOU. A. **Influence of glass cullet in cement pastes**.China Particuology. China, 2006. p. 234-237.
- 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**, 2012. p. 680-686.
- KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, 2009. p. 107-113.
- KUDO, E. K.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. **Squeeze Flow aplicado a argamassas colantes: influência de parâmetros experimentais de configuração e taxa de deslocamento**, Belo Horizonte, n. Anais do IV SBTA., 2011.
- LIMBACHIYA., M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, 2009. p. 1078-1083.
- 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, 2012. p. 46-52.
- LÚXAN M. P., MADRUGA. F. SAAVEDRA. J. **Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement**. Cement and Concrete Research, 1989. p. 63-68.

MACIEL, L. , BARROS, M. S. B. SABBATINI, F. H. **Recomendações para Execução de Revestimento de Argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos.** PINI, São Paulo, 1998, pg.35.

MALKIN, A. Y. **Rehology Fundamental.** ChemTech Publishing. Canada, 1994.

MATA, T. M. C. P. **Comparação de processos de reutilização/reciclagem usando a metodologia de análise de ciclo-de-vida,** 1998.

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

SUNDARRAJA, M.C. **Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete.** **Construction and Building Materials**, v. 23, 2009. Pg.596-600.

MEHTA, P. K., FOLLIARD, K. J., 1995, **Rice husk ash – A unique supplementary cementing material: durability aspects.** In: Second ACI/CANMET International Symposium on Advances in Concrete Technology, Las Vegas, United State of America, pg. 531-541.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutural, propriedades e materiais.** IBRACON, São Paulo, v. 3, p. 674, 2008.

MUNHOZ, F. A. D. C. **Efeito de adições activas na mitigação das reacções álcali-sílica e álcali-silicato,** 2007. pg.166.

NEHDI, M.; REHAN, R. **Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry.** *Environmental Science & Policy* 8, 2005. pg. 105-114.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** PINI, São Paulo, n. 2, 1997,pg.828

OHAMA, Y. Polymer-modified mortars and concretes. **Concrete Admixtures Handbook.** New Jersey, 1984. pg.337-429.

OLIVEIRA, I. R., STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PADOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas.Principios e Aplicações em Processamento Cerâmica.** São Paulo, 2000. pg. 224.

OLMO, C. E. A. Morteros cola: características y condiciones de empleo. **Informes de la Construcción**, 1982. pg. 41-8.

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.pg.10.

BANFILL, P.F.G., SAUNDERS, D.C. **On the viscometric examination of cement pastes.** Cement and Concrete Research, 1993. p. 363-370.

PENACHO, P. M. **Desempenho de argamassas com incorporação de resíduos finos de vidro: Reciclagem de agregados (RCD) e reação álcalis-silica (RAS).** Lisboa, 2012. pg.292.

PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composição cerâmicas e cimentícias.** Departamento de Engenharia Cerâmica e do vidro, 2006.pg.15-27.

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**, 2012. p. 197-203.

PILEGGI, R. G., STUDART, A. R., PANDOLFELLI V.C. How mixing affects the rheology of refractory castables, Part1, Part2. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 80, 2001. p. 27-42.

PÓVOAS, Y. V., JOHN, V. M.; CINCOTTO, M. A. Normalização de Argamassas Colantes.. **Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, Salvador, p. 501-512, 1997.

PÓVOAS, Y. V. **Tempo em aberto da argamassa colante: método da mediana e influência dos aditivos HEC e Resina PVAc.** Escola Politécnica da USP. São Paulo, p. 156. 1999.

PÓVOAS, Y. V. **Avaliação da formação de película na argamassa colante e sua influência na adesão.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 159. 2005.

RECICLAGEM., CEMPRE - **Consórcio Empresarial para a Reciclagem.** Disponível em: <www.cempre.org.br>. Acesso em: janeiro 2015.

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo sobre a utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias**, Fortaleza, 2010.

SANTOS, A. R. F. **Ficha técnica de iniciação de pesquisa.** Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2009, pg.5

SHAO Y, THIBAUT L, SHYLES M & DAMIAN R. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, 2000. p. 91-100.

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

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

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

SILVA, C. O. **Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante**, São Paulo, 2003.pg.45-61

SILVA, H. S. **Estudo do envelhecimento das barragens de betão e de alvenaria** – Alteração físicoquímica dos materiais, 1992.

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.

STEFFE, J. F. **Rhological Methods in Foog Process Enginnering**. East Lansing USA, p. 428, 1996.

TANNER, R. I. **Engineering Rheology**, New York, 1998.pg.66

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

URBAN, D. & Takamura, K. **Polymer Dispersions and Their Industrial Applications**, 2005.pg 442.

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**, 2011. p. 791-797.

YUKSEL, C. E. A. Evaluation of three test methods for determining the alkali-silica reactivity of glass aggregate. **Cement & Concrete Composites**, 2013. p. 57-64.

Anexo I – Planilha de ensaio de Teor de ar incorporado (%)

<i>Percentual de resíduo</i>	<i>Subs. CP 0%</i>	<i>Subs. CP 10%</i>	<i>Subs. CP 15%</i>	<i>Subs. CP 20%</i>
<i>Substituição de areia 0%</i>	28,21	29,10	29,45	31,34
	28,62	28,89	29,79	31,06
	28,37	28,99	29,11	31,64
<i>Substituição de areia 10%</i>	31,68	32,15	31,05	31,58
	31,67	31,99	31,98	31,81
	31,70	31,5	31,37	31,66
<i>Substituição de areia 15%</i>	32,5	32,57	31,76	31,99
	32,10	32,45	31,69	31,89
	32,00	32,65	31,63	32,05
<i>Substituição de areia 20%</i>	32,67	32,67	32,07	32,03
	32,34	32,68	32,20	31,90

Anexo II – Resumo dos valores da análise de variância (ANOVA) – Teor de ar incorporado

RESUMO					
<i>Substituição de areia 0%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	85,2	86,98	88,35	94,04	354,57
Média	28,4	28,99333	29,45	31,34667	29,5475
Variância	0,0427	0,011033	0,1156	0,084133	1,374366
<i>Substituição de areia 10%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	95,05	95,64	94,4	95,05	380,14
Média	31,68333	31,88	31,46667	31,68333	31,67833
Variância	0,000233	0,1147	0,223233	0,013633	0,087288
<i>Substituição de areia 15%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	96,6	97,67	95,08	95,93	385,28
Média	32,2	32,55667	31,69333	31,97667	32,10667
Variância	0,07	0,010133	0,004233	0,006533	0,125333
<i>Substituição de areia 20%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	97,11	97,94	96,37	95,98	387,4
Média	32,37	32,64667	32,12333	31,99333	32,28333
Variância	0,0819	0,002433	0,004633	0,006633	0,085352
<i>Total</i>					
Contagem	12	12	12	12	
Soma	373,96	378,23	374,2	381	
Média	31,16333	31,51917	31,18333	31,75	
Variância	2,881915	2,440881	1,216424	0,095909	

Anexo III – Planilha de ensaio de Retenção de água (%)

<i>Percentual de resíduo</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>
<i>Substituição de areia 0%</i>	99,3	97,2	99,8	99,1
	99,23	97,28	99,56	99,16
	99,32	97,15	99,9	98,93
<i>Substituição de areia 10%</i>	98,9	99,2	97,9	99,6
	98,88	99,45	99,38	99,58
	98,90	99,45	98,91	98,96
<i>Substituição de areia 15%</i>	99,6	99,9	98,9	99,2
	99,79	98,22	98,60	99,65
	99,46	98,89	98,94	99,85
<i>Substituição de areia 20%</i>	98,4	99,3	99,7	99
	98,35	99,26	99,35	98,50
	98,55	99,45	99,87	99,4

Anexo IV - Resumo dos valores da análise de variância (ANOVA) – Retenção de água

RESUMO					
<i>Substituição de areia 0%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	297,85	291,63	299,26	297,19	1185,93
Média	99,28333	97,21	99,75333	99,06333	98,8275
Variância	0,002233	0,0043	0,030533	0,014233	1,028475
<i>Substituição de areia 10%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	296,68	298,1	296,19	298,14	1189,11
Média	98,89333	99,36667	98,73	99,38	99,0925
Variância	0,000133	0,020833	0,5719	0,1324	0,221566
<i>Substituição de areia 15%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	298,85	297,01	296,44	298,7	1191
Média	99,61667	99,00333	98,81333	99,56667	99,25
Variância	0,027433	0,715233	0,034533	0,110833	0,294073
<i>Substituição de areia 20%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	3	3	3	3	12
Soma	295,3	298,01	298,92	296,9	1189,13
Média	98,43333	99,33667	99,64	98,96667	99,09417
Variância	0,010833	0,010033	0,0703	0,203333	0,274372
Total					
Contagem	12	12	12	12	
Soma	1188,68	1184,75	1190,81	1190,93	
Média	99,05667	98,72917	99,23417	99,24417	
Variância	0,22017	0,997845	0,364645	0,147099	

Anexo V – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa) – Cura Normal

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 0%</i>	0,69	A/P - 70	0,78	A/P - 60	0,55	A/P - 70	0,44	A/P - 60
	0,94	A/P - 70	0,57	A/P - 60	0,50	A/P - 40	0,39	A/P - 60
	0,40	A/P - 60	0,89	A/P - 60	0,44	A/P - 40	0,27	A/P - 90
	0,71	A/P - 70	0,40	A/P - 60	0,44	A/P - 40	0,27	A/P - 90
	0,73	A/P - 60	0,70	A/P - 60	0,42	A/P - 50	0,75	A/P - 60
	0,78	A/P - 70	0,55	A/P - 70	0,43	A/P - 70	0,32	A/P - 80
	0,98	A/P - 60	0,60	A/P - 60	0,60	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,65	A/P - 60	0,59	A/P - 60	0,63	A/P - 60	0,56	A/P - 70
	0,76	A/P - 60	0,71	A/P - 60	0,56	A/P - 50	0,32	A/P - 80
	0,85	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,80	A/P - 70
	0,66	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,52	A/P - 70	0,45	A/P - 70
	0,84	A/P - 60	0,64	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,36	A/P - 80
	0,41	A/P - 50	0,66	A/P - 50	0,44	A/P - 50	0,32	A/P - 80
	0,62	A/P - 50	0,48	A/P - 60	0,41	A/P - 50	0,36	A/P - 80
	0,84	A/P - 50	0,76	A/P - 50	0,53	A/P - 70	0,48	A/P - 50
	0,60	A/P - 50	0,52	A/P - 50	0,40	A/P - 70	0,40	A/P - 50
	0,76	A/P - 50	0,67	A/P - 50	0,58	A/P - 50	0,53	A/P - 50
	0,44	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,55	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,39	A/P - 80	0,59	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,28	A/P - 90
	0,92	A/P - 70	0,77	A/P - 70	0,55	A/P - 70	0,54	A/P - 70
	0,36	A/P - 90	0,80	A/P - 70	0,51	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,67	A/P - 70	0,55	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,40	A/P - 70
	0,76	A/P - 60	0,69	A/P - 60	0,43	A/P - 60	0,42	A/P - 60
	0,62	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,53	A/P - 70	0,46	A/P - 70
	0,77	A/P - 70	0,60	A/P - 70	0,31	A/P - 80	0,44	A/P - 70
	0,73	A/P - 40	0,72	A/P - 70	0,46	A/P - 40	0,48	A/P - 70
	0,72	A/P - 40	0,51	A/P - 70	0,92	A/P - 40	0,39	A/P - 80
	0,75	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,55	A/P - 70	0,53	A/P - 70
	0,72	A/P - 40	0,48	A/P - 50	0,48	A/P - 70	0,39	A/P - 80
	0,71	A/P - 60	0,74	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,52	A/P - 70

Anexo VI – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa) – Cura Normal

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 10%</i>	0,65	A/P - 40	0,69	A/P - 50	0,47	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,38	A/P - 80	0,62	A/P - 50	0,48	A/P - 60	0,53	A/P - 50
	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,48	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,45	A/P - 60	0,48	A/P - 70
	0,47	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,47	A/P - 40	0,48	A/P - 70	0,47	A/P - 60	0,54	A/P - 60
	0,99	A/P - 60	0,53	A/P - 50	0,53	A/P - 50	0,53	A/P - 50
	0,45	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,52	A/P - 60
	0,50	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,44	A/P - 60
	0,58	A/P - 60	0,64	A/P - 50	0,51	A/P - 50	0,55	A/P - 50
	0,48	A/P - 40	0,57	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,51	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,53	A/P - 60
	0,52	A/P - 50	0,64	A/P - 50	0,52	A/P - 50	0,54	A/P - 50
	0,47	A/P - 50	0,52	A/P - 50	0,46	A/P - 50	0,49	A/P - 50
	0,48	A/P - 50	0,56	A/P - 50	0,56	A/P - 50	0,48	A/P - 50
	0,50	A/P - 50	0,50	A/P - 50	0,40	A/P - 50	0,44	A/P - 50
	0,46	A/P - 50	0,56	A/P - 50	0,50	A/P - 50	0,52	A/P - 50
	0,47	A/P - 40	0,62	A/P - 50	0,46	A/P - 50	0,52	A/P - 50
	0,488	A/P - 60	0,66	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,54	A/P - 60
	0,52	A/P - 70	0,56	A/P - 70	0,40	A/P - 60	0,52	A/P - 70
	0,53	A/P - 70	0,66	A/P - 70	0,50	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,51	A/P - 40	0,54	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,49	A/P - 70
	0,51	A/P - 60	0,55	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,52	A/P - 70	0,74	A/P - 80	0,54	A/P - 60	0,54	A/P - 70
	0,55	A/P - 40	0,52	A/P - 50	0,52	A/P - 50	0,54	A/P - 50
	0,54	A/P - 40	0,51	A/P - 80	0,53	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,51	A/P - 40	0,46	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,48	A/P - 40	0,50	A/P - 70	0,53	A/P - 50	0,43	A/P - 70
	0,50	A/P - 40	0,52	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,52	A/P - 50
	0,53	A/P - 60	0,47	A/P - 80	0,51	A/P - 60	0,53	A/P - 50

**Anexo VII – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura Normal**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 15%</i>	0,55	A/P - 70	0,49	A/P - 60	0,46	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,49	A/P - 50	0,60	A/P - 40	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,46	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,42	A/P - 60
	0,29	A/P - 90	0,49	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,41	A/P - 70
	0,58	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,45	A/P - 60
	0,66	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,46	A/P - 70	0,43	A/P - 70
	0,75	A/P - 40	0,44	A/P - 50	0,46	A/P - 50	0,46	A/P - 50
	0,75	A/P - 40	0,48	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,40	A/P - 60
	0,52	A/P - 60	0,39	A/P - 90	0,52	A/P - 60	0,53	A/P - 60
	0,57	A/P - 50	0,64	A/P - 50	0,45	A/P - 50	0,44	A/P - 50
	0,56	A/P - 70	0,53	A/P - 70	0,49	A/P - 70	0,49	A/P - 70
	0,55	A/P - 60	0,57	A/P - 60	0,55	A/P - 60	0,54	A/P - 60
	0,58	A/P - 40	0,53	A/P - 70	0,48	A/P - 50	0,48	A/P - 50
	0,52	A/P - 50	0,48	A/P - 50	0,40	A/P - 90	0,39	A/P - 50
	0,53	A/P - 40	0,52	A/P - 70	0,41	A/P - 80	0,41	A/P - 50
	0,55	A/P - 50	0,54	A/P - 50	0,43	A/P - 80	0,43	A/P - 50
	0,54	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,41	A/P - 70	0,40	A/P - 50
	0,57	A/P - 50	0,48	A/P - 50	0,41	A/P - 70	0,40	A/P - 50
	0,52	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,52	A/P - 70	0,53	A/P - 60	0,53	A/P - 70	0,52	A/P - 70
	0,58	A/P - 40	0,40	A/P - 80	0,40	A/P - 80	0,39	A/P - 70
	0,56	A/P - 70	0,54	A/P - 80	0,42	A/P - 70	0,42	A/P - 70
	0,52	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,44	A/P - 60
	0,57	A/P - 70	0,74	A/P - 40	0,49	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,56	A/P - 50	0,45	A/P - 80	0,39	A/P - 90	0,37	A/P - 50
	0,50	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,44	A/P - 60
	0,57	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,40	A/P - 60
	0,55	A/P - 40	0,50	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,51	A/P - 70
0,56	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,49	A/P - 60	
0,56	A/P - 40	0,47	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,47	A/P - 60	

**Anexo VIII – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura Normal**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 20%</i>	0,33	A/P - 90	0,45	A/P - 60	0,40	A/P - 70	0,36	A/P - 80
	0,40	A/P - 80	0,54	A/P - 50	0,40	A/P - 70	0,36	A/P - 80
	0,39	A/P - 90	0,44	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,32	A/P - 80
	0,40	A/P - 80	0,52	A/P - 60	0,36	A/P - 80	0,37	A/P - 80
	0,34	A/P - 100	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,40	A/P - 80
	0,36	A/P - 90	0,50	A/P - 70	0,49	A/P - 70	0,32	A/P - 80
	0,36	A/P - 90	0,36	A/P - 80	0,47	A/P - 70	0,42	A/P - 80
	0,35	A/P - 80	0,47	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,38	A/P - 80	0,38	A/P - 80	0,47	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,37	A/P - 80	0,56	A/P - 50	0,47	A/P - 70	0,37	A/P - 70
	0,44	A/P - 70	0,47	A/P - 60	0,38	A/P - 70	0,36	A/P - 70
	0,39	A/P - 70	0,57	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,33	A/P - 80
	0,34	A/P - 80	0,49	A/P - 50	0,49	A/P - 50	0,37	A/P - 80
	0,33	A/P - 80	0,56	A/P - 50	0,47	A/P - 50	0,40	A/P - 70
	0,32	A/P - 80	0,56	A/P - 60	0,48	A/P - 50	0,42	A/P - 70
	0,41	A/P - 70	0,47	A/P - 70	0,39	A/P - 80	0,39	A/P - 80
	0,37	A/P - 80	0,55	A/P - 70	0,36	A/P - 80	0,36	A/P - 80
	0,40	A/P - 60	0,52	A/P - 70	0,40	A/P - 60	0,35	A/P - 80
	0,45	A/P - 60	0,55	A/P - 80	0,44	A/P - 60	0,32	A/P - 80
	0,37	A/P - 80	0,44	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,42	A/P - 70
	0,33	A/P - 90	0,36	A/P - 80	0,44	A/P - 70	0,31	A/P - 80
	0,25	A/P - 90	0,45	A/P - 70	0,39	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,39	A/P - 80	0,54	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,39	A/P - 60
	0,40	A/P - 70	0,62	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,37	A/P - 70
	0,29	A/P - 100	0,48	A/P - 70	0,36	A/P - 50	0,44	A/P - 70
	0,36	A/P - 90	0,50	A/P - 60	0,44	A/P - 70	0,45	A/P - 70
	0,26	A/P - 100	0,49	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,36	A/P - 80
	0,32	A/P - 80	0,48	A/P - 70	0,42	A/P - 80	0,32	A/P - 70
	0,45	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,33	A/P - 80
	0,39	A/P - 70	0,45	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,35	A/P - 60

Anexo IX – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa) – Cura em Estufa

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 0%</i>	0,55	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,44	A/P - 70	0,48	A/P - 60
	0,45	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,40	A/P - 70	0,36	A/P - 60
	0,51	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,39	A/P - 70	0,31	A/P - 60
	0,42	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,41	A/P - 70	0,37	A/P - 60
	0,48	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,54	A/P - 60	0,44	A/P - 60
	0,42	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,38	A/P - 80	0,41	A/P - 60
	0,46	A/P - 50	0,48	A/P - 50	0,46	A/P - 70	0,38	A/P - 50
	0,53	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,50	A/P - 60
	0,56	A/P - 50	0,53	A/P - 50	0,53	A/P - 50	0,47	A/P - 50
	0,52	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,46	A/P - 60	0,54	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,45	A/P - 60
	0,51	A/P - 60	0,41	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,39	A/P - 90
	0,55	A/P - 50	0,53	A/P - 50	0,53	A/P - 70	0,37	A/P - 90
	0,51	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,40	A/P - 60
	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,41	A/P - 60	0,46	A/P - 60
	0,50	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,49	A/P - 80	0,39	A/P - 70
	0,56	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,47	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,50	A/P - 60
	0,55	A/P - 70	0,56	A/P - 70	0,52	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,52	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,48	A/P - 70	0,52	A/P - 70	0,44	A/P - 60	0,49	A/P - 70
	0,54	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,39	A/P - 60	0,39	A/P - 80
	0,56	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,46	A/P - 60	0,42	A/P - 70
	0,56	A/P - 60	0,42	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,40	A/P - 70
	0,44	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,46	A/P - 70
	0,48	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,39	A/P - 80	0,39	A/P - 80
	0,52	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 70
	0,51	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,43	A/P - 80	0,48	A/P - 70
	0,55	A/P - 60	0,39	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,45	A/P - 70

Anexo X – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa) – Cura em Estufa

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 10%</i>	0,43	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,41	A/P - 70
	0,64	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,45	A/P - 80	0,46	A/P - 70
	0,55	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,36	A/P - 70
	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,41	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,49	A/P - 70
	0,46	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,46	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,36	A/P - 80	0,36	A/P - 50	0,36	A/P - 80	0,36	A/P - 80
	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,31	A/P - 80
	0,71	A/P - 40	0,71	A/P - 60	0,71	A/P - 40	0,37	A/P - 80
	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 50	0,51	A/P - 50	0,55	A/P - 60
	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 70
	0,53	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,53	A/P - 70
	0,51	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,44	A/P - 70
	0,44	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,53	A/P - 50	0,44	A/P - 70
	0,48	A/P - 70	0,56	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,39	A/P - 70
	0,50	A/P - 70	0,50	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,44	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,46	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,53	A/P - 70
	0,53	A/P - 60	0,53	A/P - 70	0,45	A/P - 60	0,51	A/P - 70
	0,51	A/P - 70	0,51	A/P - 70	0,41	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,53	A/P - 70	0,51	A/P - 70	0,39	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,52	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,53	A/P - 70	0,49	A/P - 70
	0,48	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,43	A/P - 70	0,39	A/P - 70
	0,52	A/P - 70	0,49	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,54	A/P - 70
	0,56	A/P - 60	0,54	A/P - 70	0,52	A/P - 60	0,54	A/P - 60
	0,51	A/P - 60	0,54	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,44	A/P - 60
	0,48	A/P - 70	0,42	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,49	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,45	A/P - 60
	0,49	A/P - 70	0,53	A/P - 70	0,51	A/P - 60	0,42	A/P - 60
	0,54	A/P - 70	0,45	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,40	A/P - 60

Anexo XI – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa) – Cura em Estufa

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 15%</i>	0,36	A/P - 80	0,53	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,35	A/P - 80	0,54	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,34	A/P - 80	0,41	A/P - 60	0,40	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,32	A/P - 80	0,53	A/P - 60	0,39	A/P - 70	0,39	A/P - 80
	0,33	A/P - 80	0,36	A/P - 70	0,41	A/P - 70	0,41	A/P - 80
	0,36	A/P - 80	0,35	A/P - 70	0,43	A/P - 70	0,43	A/P - 80
	0,42	A/P - 80	0,34	A/P - 70	0,42	A/P - 70	0,42	A/P - 70
	0,70	A/P - 60	0,32	A/P - 70	0,56	A/P - 70	0,56	A/P - 70
	0,34	A/P - 80	0,33	A/P - 70	0,34	A/P - 70	0,34	A/P - 80
	0,39	A/P - 80	0,36	A/P - 70	0,39	A/P - 70	0,39	A/P - 80
	0,36	A/P - 80	0,45	A/P - 60	0,44	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,39	A/P - 80	0,49	A/P - 60	0,54	A/P - 60	0,54	A/P - 70
	0,32	A/P - 80	0,39	A/P - 60	0,41	A/P - 60	0,41	A/P - 70
	0,34	A/P - 80	0,30	A/P - 50	0,40	A/P - 60	0,40	A/P - 70
	0,35	A/P - 80	0,32	A/P - 80	0,45	A/P - 60	0,45	A/P - 70
	0,40	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,46	A/P - 70
	0,41	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,44	A/P - 70
	0,58	A/P - 60	0,46	A/P - 70	0,39	A/P - 60	0,39	A/P - 70
	0,51	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,45	A/P - 70	0,56	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,45	A/P - 70	0,56	A/P - 70	0,39	A/P - 70	0,39	A/P - 80
	0,49	A/P - 70	0,54	A/P - 70	0,42	A/P - 70	0,42	A/P - 80
	0,39	A/P - 60	0,42	A/P - 60	0,46	A/P - 60	0,46	A/P - 70
	0,30	A/P - 80	0,48	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,32	A/P - 90	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 70
	0,35	A/P - 90	0,34	A/P - 70	0,30	A/P - 60	0,30	A/P - 80
	0,48	A/P - 60	0,32	A/P - 70	0,32	A/P - 60	0,32	A/P - 80
	0,54	A/P - 60	0,33	A/P - 80	0,35	A/P - 60	0,35	A/P - 80
	0,40	A/P - 90	0,36	A/P - 80	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 80
	0,48	A/P - 60	0,42	A/P - 80	0,54	A/P - 60	0,54	A/P - 60

**Anexo XII – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura em Estufa**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 20%</i>	0,31	A/P - 80	0,48	A/P - 60	0,40	A/P - 70	0,31	A/P - 70
	0,47	A/P - 70	0,49	A/P - 60	0,38	A/P - 70	0,47	A/P - 70
	0,50	A/P - 70	0,40	A/P - 60	0,46	A/P - 70	0,50	A/P - 70
	0,55	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,53	A/P - 70	0,55	A/P - 60
	0,53	A/P - 70	0,52	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,53	A/P - 60
	0,46	A/P - 70	0,50	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,51	A/P - 60
	0,56	A/P - 70	0,36	A/P - 80	0,40	A/P - 80	0,54	A/P - 50
	0,52	A/P - 70	0,52	A/P - 60	0,49	A/P - 80	0,40	A/P - 60
	0,65	A/P - 70	0,65	A/P - 60	0,53	A/P - 80	0,40	A/P - 80
	0,56	A/P - 70	0,56	A/P - 50	0,44	A/P - 50	0,37	A/P - 80
	0,36	A/P - 70	0,51	A/P - 60	0,41	A/P - 60	0,36	A/P - 80
	0,46	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,49	A/P - 60	0,33	A/P - 80
	0,39	A/P - 80	0,52	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 80
	0,55	A/P - 60	0,46	A/P - 50	0,46	A/P - 50	0,36	A/P - 80
	0,48	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,31	A/P - 80
	0,56	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,37	A/P - 80
	0,40	A/P - 60	0,43	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,40	A/P - 80
	0,51	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,52	A/P - 70	0,51	A/P - 60
	0,62	A/P - 60	0,55	A/P - 60	0,56	A/P - 70	0,62	A/P - 60
	0,56	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,56	A/P - 70
	0,56	A/P - 70	0,45	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,31	A/P - 70
	0,48	A/P - 70	0,49	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,40	A/P - 60	0,39	A/P - 60	0,39	A/P - 60	0,39	A/P - 60
	0,52	A/P - 70	0,55	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,58	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,46	A/P - 60
	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 70	0,39	A/P - 60
	0,54	A/P - 50	0,40	A/P - 60	0,40	A/P - 70	0,48	A/P - 90
	0,52	A/P - 50	0,51	A/P - 60	0,51	A/P - 70	0,52	A/P - 90
0,43	A/P - 50	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,43	A/P - 90	
0,31	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,31	A/P - 90	

**Anexo XIII – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura Submersa**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 0%</i>	0,52	A/P – 40	0,51	A/P - 50	0,48	A/P - 50	0,47	A/P - 50
	0,44	A/P – 40	0,44	A/P - 50	0,78	A/P - 50	0,51	A/P - 40
	0,48	A/P - 40	0,60	A/P - 50	0,46	A/P - 60	0,32	A/P - 40
	0,54	A/P - 40	0,49	A/P - 50	0,37	A/P - 60	0,59	A/P - 40
	0,49	A/P – 40	0,76	A/P – 50	0,65	A/P – 60	0,65	A/P – 40
	0,46	A/P – 40	0,44	A/P – 50	0,43	A/P – 60	0,48	A/P – 40
	0,46	A/P – 40	0,40	A/P – 50	0,67	A/P – 60	0,49	A/P – 40
	0,55	A/P – 40	0,39	A/P – 60	1,05	A/P – 60	0,30	A/P – 50
	0,49	A/P – 60	0,45	A/P – 60	0,22	A/P – 40	0,43	A/P – 50
	0,45	A/P – 60	0,56	A/P – 50	0,48	A/P – 40	0,36	A/P – 50
	0,54	A/P – 60	0,52	A/P – 60	0,48	A/P – 40	0,46	A/P – 70
	0,52	A/P – 60	0,52	A/P – 60	0,62	A/P – 40	0,48	A/P – 70
	0,51	A/P – 60	0,45	A/P – 60	0,52	A/P – 40	0,52	A/P – 70
	0,55	A/P – 60	0,57	A/P – 50	0,58	A/P – 40	0,52	A/P – 70
	0,53	A/P – 60	0,52	A/P – 70	0,48	A/P – 40	0,46	A/P – 60
	0,53	A/P – 60	0,48	A/P – 60	0,54	A/P – 40	0,49	A/P – 60
	0,51	A/P – 60	0,52	A/P – 60	0,53	A/P – 40	0,48	A/P – 60
	0,53	A/P – 60	0,45	A/P – 60	0,60	A/P – 60	0,52	A/P – 60
	0,48	A/P – 60	0,45	A/P – 60	0,53	A/P – 60	0,52	A/P – 60
	0,48	A/P – 60	0,52	A/P – 70	0,48	A/P – 40	0,44	A/P – 70
	0,51	A/P – 60	0,48	A/P – 70	0,67	A/P – 70	0,52	A/P – 70
	0,46	A/P – 60	0,45	A/P – 70	0,51	A/P – 70	0,52	A/P – 40
	0,50	A/P – 60	0,45	A/P – 60	0,57	A/P – 60	0,52	A/P – 40
	0,53	A/P – 60	0,53	A/P – 50	0,50	A/P – 70	0,45	A/P – 40
	0,51	A/P – 60	0,48	A/P – 60	0,60	A/P – 60	0,49	A/P – 40
	0,46	A/P – 60	0,53	A/P – 60	0,50	A/P – 60	0,51	A/P – 50
	0,46	A/P – 60	0,53	A/P – 50	0,52	A/P – 60	0,48	A/P – 50
	0,48	A/P – 60	0,48	A/P – 70	0,59	A/P – 60	0,46	A/P – 60
	0,50	A/P – 60	0,49	A/P – 70	0,53	A/P – 60	0,43	A/P – 60
	0,51	A/P – 60	0,54	A/P – 70	0,55	A/P – 60	0,41	A/P – 60

**Anexo XIV – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura Submersa**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 10%</i>	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,53	A/P - 50	0,55	A/P - 60
	0,43	A/P - 70	0,43	A/P - 60	0,45	A/P - 50	0,54	A/P - 60
	0,54	A/P - 70	0,56	A/P - 60	0,53	A/P - 50	0,46	A/P - 60
	0,44	A/P - 70	0,43	A/P - 60	0,30	A/P - 50	0,48	A/P - 60
	0,50	A/P - 70	0,54	A/P - 60	0,43	A/P - 60	0,49	A/P - 60
	0,45	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,36	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,61	A/P - 50	0,40	A/P - 70	0,45	A/P - 50	0,78	A/P - 50
	0,45	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,62	A/P - 60	0,46	A/P - 60
	0,62	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,79	A/P - 60	0,37	A/P - 60
	0,79	A/P - 70	0,56	A/P - 50	0,51	A/P - 60	0,55	A/P - 70
	0,49	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,58	A/P - 60
	0,52	A/P - 70	0,52	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,75	A/P - 60
	0,58	A/P - 60	0,52	A/P - 70	0,53	A/P - 70	0,41	A/P - 60
	0,75	A/P - 70	0,58	A/P - 60	0,53	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,41	A/P - 60	0,56	A/P - 70	0,51	A/P - 60	0,53	A/P - 60
	0,40	A/P - 60	0,50	A/P - 70	0,46	A/P - 60	0,58	A/P - 60
	0,53	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,49	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,52	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,54	A/P - 60
	0,52	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,53	A/P - 60
	0,58	A/P - 70	0,51	A/P - 60	0,41	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,52	A/P - 70	0,52	A/P - 70	0,39	A/P - 60	0,67	A/P - 70
	0,52	A/P - 70	0,52	A/P - 50	0,53	A/P - 60	0,51	A/P - 70
	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,45	A/P - 60	0,57	A/P - 60
	0,51	A/P - 70	0,51	A/P - 50	0,49	A/P - 70	0,50	A/P - 70
	0,55	A/P - 60	0,55	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,54	A/P - 70
	0,54	A/P - 60	0,45	A/P - 50	0,48	A/P - 70	0,54	A/P - 70
	0,46	A/P - 70	0,45	A/P - 50	0,51	A/P - 70	0,44	A/P - 70
	0,53	A/P - 70	0,52	A/P - 50	0,55	A/P - 70	0,50	A/P - 70
	0,50	A/P - 60	0,53	A/P - 50	0,54	A/P - 60	0,45	A/P - 70
	0,57	A/P - 70	0,45	A/P - 50	0,46	A/P - 60	0,61	A/P - 70

**Anexo XV – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura Submersa**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 15%</i>	0,80	A/P - 40	0,39	A/P - 80	0,80	A/P - 60	0,80	A/P - 70
	0,63	A/P - 40	0,45	A/P - 60	0,76	A/P - 70	0,76	A/P - 70
	0,65	A/P - 40	0,56	A/P - 60	0,71	A/P - 70	0,71	A/P - 70
	0,69	A/P - 40	0,79	A/P - 40	0,67	A/P - 60	0,67	A/P - 70
	0,55	A/P - 40	0,80	A/P - 40	0,41	A/P - 60	0,41	A/P - 70
	0,82	A/P - 50	0,64	A/P - 40	0,47	A/P - 70	0,47	A/P - 60
	0,79	A/P - 50	0,74	A/P - 40	0,51	A/P - 50	0,51	A/P - 70
	0,80	A/P - 50	0,32	A/P - 70	0,32	A/P - 60	0,32	A/P - 60
	0,64	A/P - 60	0,33	A/P - 70	0,34	A/P - 60	0,34	A/P - 60
	0,74	A/P - 50	0,36	A/P - 70	0,39	A/P - 50	0,39	A/P - 50
	0,80	A/P - 50	0,45	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,79	A/P - 60	0,64	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,52	A/P - 60
	0,75	A/P - 60	0,62	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,52	A/P - 60
	0,64	A/P - 50	0,71	A/P - 50	0,44	A/P - 50	0,44	A/P - 70
	0,62	A/P - 50	0,73	A/P - 60	0,62	A/P - 60	0,62	A/P - 60
	0,71	A/P - 50	0,48	A/P - 70	0,71	A/P - 60	0,71	A/P - 60
	0,73	A/P - 50	0,45	A/P - 70	0,73	A/P - 60	0,73	A/P - 60
	0,78	A/P - 50	0,45	A/P - 70	0,78	A/P - 60	0,78	A/P - 60
	0,64	A/P - 50	0,52	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,48	A/P - 60
	0,68	A/P - 50	0,56	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,40	A/P - 70
	0,75	A/P - 50	0,53	A/P - 70	0,45	A/P - 70	0,45	A/P - 70
	0,76	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,49	A/P - 70	0,49	A/P - 70
	0,73	A/P - 60	0,53	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,51	A/P - 60
	0,76	A/P - 70	0,53	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,48	A/P - 70
	0,80	A/P - 60	0,71	A/P - 60	0,69	A/P - 60	0,69	A/P - 60
	0,76	A/P - 60	0,67	A/P - 60	0,55	A/P - 60	0,55	A/P - 60
	0,71	A/P - 60	0,75	A/P - 40	0,82	A/P - 60	0,82	A/P - 60
	0,67	A/P - 50	0,67	A/P - 40	0,35	A/P - 70	0,35	A/P - 60
	0,75	A/P - 50	0,36	A/P - 80	0,48	A/P - 70	0,48	A/P - 60
	0,67	A/P - 50	0,42	A/P - 60	0,54	A/P - 70	0,54	A/P - 60

**Anexo XVI – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (Mpa)
– Cura Submersa**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 20%</i>	0,78	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,72	A/P - 40	1,05	A/P - 60
	0,46	A/P - 60	0,49	A/P - 70	0,68	A/P - 40	0,22	A/P - 60
	0,84	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,67	A/P - 40	0,48	A/P - 60
	0,69	A/P - 60	0,53	A/P - 70	0,72	A/P - 40	0,48	A/P - 60
	0,54	A/P - 60	0,48	A/P - 70	0,60	A/P - 40	0,54	A/P - 60
	0,68	A/P - 60	0,49	A/P - 70	0,47	A/P - 70	0,51	A/P - 60
	0,72	A/P - 50	0,54	A/P - 70	0,51	A/P - 60	0,68	A/P - 50
	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 70	0,32	A/P - 80	0,72	A/P - 60
	0,68	A/P - 60	0,68	A/P - 100	0,59	A/P - 70	0,56	A/P - 60
	0,65	A/P - 50	0,65	A/P - 100	0,44	A/P - 70	0,68	A/P - 50
	0,72	A/P - 60	0,66	A/P - 100	0,41	A/P - 70	0,60	A/P - 60
	0,68	A/P - 60	0,76	A/P - 40	0,49	A/P - 70	0,50	A/P - 60
	0,67	A/P - 60	0,62	A/P - 40	0,51	A/P - 70	0,52	A/P - 60
	0,72	A/P - 50	0,56	A/P - 40	0,48	A/P - 70	0,53	A/P - 50
	0,60	A/P - 60	0,56	A/P - 40	0,46	A/P - 70	0,60	A/P - 60
	0,56	A/P - 60	0,52	A/P - 40	0,56	A/P - 70	0,53	A/P - 70
	0,66	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,76	A/P - 40	0,67	A/P - 50
	0,76	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,80	A/P - 40	0,72	A/P - 40
	0,62	A/P - 60	0,60	A/P - 60	0,52	A/P - 40	0,60	A/P - 50
	0,56	A/P - 70	0,44	A/P - 70	0,40	A/P - 70	0,56	A/P - 50
	0,56	A/P - 70	0,80	A/P - 70	0,46	A/P - 70	0,48	A/P - 40
	0,76	A/P - 70	0,52	A/P - 70	0,84	A/P - 30	0,62	A/P - 30
	0,80	A/P - 60	0,58	A/P - 60	0,69	A/P - 30	0,52	A/P - 30
	0,52	A/P - 70	0,56	A/P - 70	0,54	A/P - 30	0,78	A/P - 30
	0,58	A/P - 60	0,54	A/P - 60	0,46	A/P - 30	0,46	A/P - 70
	0,56	A/P - 60	0,56	A/P - 60	0,48	A/P - 40	0,37	A/P - 80
	0,54	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,52	A/P - 40	0,54	A/P - 50
	0,62	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,52	A/P - 40	0,62	A/P - 50
	0,72	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,46	A/P - 60	0,72	A/P - 50
	0,68	A/P - 60	0,52	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,68	A/P - 50

Anexo XVII – Resumo dos valores da análise de variância (ANOVA – Resistência de aderência à tração – Cura Normal

RESUMO	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	
<i>Substituição de areia 0%</i>	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>	Total
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	20,76582	18,3624	15,3276	13,2716	67,72742
Média	0,69219	0,61208	0,51092	0,442387	0,564395
Variância	0,026114	0,015775	0,010837	0,01477	0,025613
<i>Substituição de areia 10%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	15,67956	16,6132	14,7824	15,0828	62,15796
Média	0,522652	0,553773	0,492747	0,50276	0,517983
Variância	0,010011	0,005445	0,00179	0,001055	0,005007
<i>Substituição de areia 15%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	16,596	15,216	13,3912	13,3912	58,5944
Média	0,5532	0,5072	0,446373	0,446373	0,488287
Variância	0,006276	0,00462	0,002019	0,002019	0,005678
<i>Substituição de areia 20%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	<i>0%</i>	<i>10%</i>	<i>15%</i>	<i>20%</i>	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	10,9764	14,8224	12,9628	11,1512	49,9128
Média	0,36588	0,49408	0,432093	0,371707	0,41594
Variância	0,002378	0,003835	0,001928	0,001497	0,005079
<i>Total</i>					
Contagem	120	120	120	120	
Soma	64,01778	65,014	56,464	52,8968	
Média	0,533482	0,541783	0,470533	0,440807	
Variância	0,024472	0,009389	0,005094	0,006893	

Anexo XVIII – Resumo dos valores da análise de variância (ANOVA) – Resistência de aderência à tração – Cura em Estufa

RESUMO	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	
<i>Substituição de areia 0%</i>	0%	10%	15%	20%	Total
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	15,23	14,654	13,845	13,0096	56,7386
Média	0,507667	0,488467	0,4615	0,433653	0,472822
Variância	0,001791	0,001975	0,002443	0,002497	0,002909
<i>Substituição de areia 10%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	15,1308	14,88	14,645	13,5852	58,241
Média	0,50436	0,496	0,488167	0,45284	0,485342
Variância	0,004219	0,003366	0,004205	0,003725	0,004169
<i>Substituição de areia 15%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	12,2408	12,774	12,8022	12,8022	50,6192
Média	0,408027	0,4258	0,42674	0,42674	0,421827
Variância	0,008268	0,007273	0,003584	0,003584	0,005598
<i>Substituição de areia 20%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	15,0176	14,6792	13,9898	13,0976	56,7842
Média	0,500587	0,489307	0,466327	0,436587	0,473202
Variância	0,006003	0,003824	0,003067	0,006901	0,005428
<i>Total</i>					
Contagem	120	120	120	120	
Soma	57,6192	56,9872	55,282	52,4946	
Média	0,48016	0,474893	0,460683	0,437455	
Variância	0,006698	0,004824	0,00373	0,004164	

Anexo XIX – Resumo dos valores da análise de variância (ANOVA) – Resistência de aderência à tração – Cura Submersa

RESUMO	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
<i>Substituição de areia 0%</i>	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	15,006	15,0116	16,4784	14,258	60,754
Média	0,5002	0,500387	0,54928	0,475267	0,506283
Variância	0,000998	0,004715	0,018749	0,00478	0,007853
<i>Substituição de areia 10%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	15,8436	14,9516	14,615	15,7004	61,1106
Média	0,52812	0,498387	0,487167	0,523347	0,509255
Variância	0,007451	0,002282	0,007294	0,00855	0,006525
<i>Substituição de areia 15%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	21,6152	16,636	16,4352	16,4352	71,1216
Média	0,720507	0,554533	0,54784	0,54784	0,59268
Variância	0,004788	0,020456	0,021287	0,021287	0,022027
<i>Substituição de areia 20%</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	<i>Subst. CP</i>	Total
	0%	10%	15%	20%	
Contagem	30	30	30	30	120
Soma	19,4436	16,46	16,5202	17,5052	69,929
Média	0,64812	0,548667	0,550673	0,583507	0,582742
Variância	0,008689	0,008426	0,016203	0,020598	0,014769
<i>Total</i>					
Contagem	120	120	120	120	
Soma	71,9084	63,0592	64,0488	63,8988	
Média	0,599237	0,525493	0,53374	0,53249	
Variância	0,013401	0,009436	0,016213	0,015018	

**Anexo XX – Planilha de ensaio de resistência de aderência à tração (MPa)
– Tempo em aberto (15 minutos)**

	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	<i>Tipo de Ruptura</i>
<i>Subst. areia 0%</i>	0,78	A/P - 40	0,61	A/P - 50	0,49	A/P - 60	0,40	A/P - 70
	0,68	A/P - 40	0,83	A/P - 30	0,57	A/P - 60	0,40	A/P - 70
	0,64	A/P - 40	0,83	A/P - 30	0,49	A/P - 60	0,45	A/P - 70
	0,75	A/P - 40	0,78	A/P - 30	0,55	A/P - 60	0,38	A/P - 80
	0,59	A/P - 50	0,73	A/P - 30	0,46	A/P - 60	0,44	A/P - 80
	0,75	A/P - 50	0,75	A/P - 30	0,45	A/P - 60	0,39	A/P - 80
	0,74	A/P - 50	0,78	A/P - 30	0,50	A/P - 50	0,49	A/P - 70
	0,58	A/P - 60	0,73	A/P - 30	0,50	A/P - 60	0,46	A/P - 70
	0,56	A/P - 60	0,68	A/P - 30	0,50	A/P - 60	0,47	A/P - 70
	0,77	A/P - 50	0,69	A/P - 30	0,45	A/P - 50	0,46	A/P - 70
<i>Subst. areia 10%</i>	0,49	A/P - 70	0,52	A/P - 50	0,44	A/P - 60	0,45	A/P - 70
	0,50	A/P - 70	0,48	A/P - 50	0,45	A/P - 60	0,52	A/P - 60
	0,50	A/P - 70	0,52	A/P - 50	0,42	A/P - 70	0,49	A/P - 50
	0,53	A/P - 70	0,56	A/P - 50	0,46	A/P - 70	0,48	A/P - 50
	0,52	A/P - 70	0,49	A/P - 50	0,46	A/P - 70	0,53	A/P - 50
	0,60	A/P - 70	0,45	A/P - 50	0,46	A/P - 70	0,53	A/P - 50
	0,58	A/P - 70	0,46	A/P - 50	0,41	A/P - 70	0,45	A/P - 50
	0,50	A/P - 70	0,55	A/P - 50	0,46	A/P - 70	0,46	A/P - 50
	0,53	A/P - 70	0,52	A/P - 60	0,44	A/P - 70	0,50	A/P - 60
	0,50	A/P - 60	0,54	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,51	A/P - 60
<i>Subst. areia 15%</i>	0,56	A/P - 70	0,48	A/P - 70	0,41	A/P - 70	0,47	A/P - 70
	0,55	A/P - 70	0,48	A/P - 60	0,46	A/P - 70	0,39	A/P - 80
	0,49	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,42	A/P - 60	0,47	A/P - 80
	0,54	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,40	A/P - 80
	0,50	A/P - 50	0,51	A/P - 60	0,40	A/P - 70	0,37	A/P - 80
	0,57	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,42	A/P - 70	0,45	A/P - 80
	0,55	A/P - 60	0,52	A/P - 60	0,43	A/P - 60	0,44	A/P - 80
	0,56	A/P - 50	0,50	A/P - 50	0,48	A/P - 70	0,48	A/P - 80
	0,55	A/P - 60	0,51	A/P - 60	0,41	A/P - 60	0,45	A/P - 80
	0,51	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,39	A/P - 80	0,44	A/P - 60
<i>Subst. areia 20%</i>	0,58	A/P - 60	0,41	A/P - 60	0,40	A/P - 60	0,36	A/P - 80
	0,44	A/P - 80	0,40	A/P - 80	0,39	A/P - 80	0,35	A/P - 80
	0,60	A/P - 60	0,46	A/P - 80	0,40	A/P - 60	0,33	A/P - 80
	0,36	A/P - 80	0,44	A/P - 70	0,36	A/P - 80	0,38	A/P - 70
	0,40	A/P - 80	0,42	A/P - 60	0,40	A/P - 80	0,32	A/P - 80
	0,45	A/P - 80	0,46	A/P - 60	0,41	A/P - 70	0,36	A/P - 80
	0,49	A/P - 80	0,48	A/P - 80	0,44	A/P - 70	0,33	A/P - 80
	0,60	A/P - 80	0,48	A/P - 60	0,45	A/P - 70	0,38	A/P - 80
	0,60	A/P - 60	0,48	A/P - 60	0,44	A/P - 60	0,36	A/P - 80
	0,49	A/P - 50	0,48	A/P - 50	0,44	A/P - 70	0,35	A/P - 80

Anexo XXI – Resumo dos valores da análise de variância (ANOVA) – Resistência de aderência à tração – Tempo em aberto (15 minutos)

RESUMO					
<i>Substituição de areia 0%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	6,8455	7,381	4,951	4,334	23,5115
Média	0,68455	0,7381	0,4951	0,4334	0,5877875
Variância	0,007086692	0,00470321	0,0015347	0,00152593	0,0199356
<i>Substituição de areia 10%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	5,2415	5,0752	4,4756	4,924	19,7163
Média	0,52415	0,50752	0,44756	0,4924	0,4929075
Variância	0,001252558	0,00128014	0,0004936	0,00098411	0,0017579
<i>Substituição de areia 15%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	5,366	4,9832	4,284	4,3592	18,9924
Média	0,5366	0,49832	0,4284	0,43592	0,47481
Variância	0,000784156	0,0003131	0,00098	0,00138474	0,0028597
<i>Substituição de areia 20%</i>	<i>Subst. CP 0%</i>	<i>Subst. CP 10%</i>	<i>Subst. CP 15%</i>	<i>Subst. CP 20%</i>	Total
Contagem	10	10	10	10	40
Soma	4,996	4,5104	4,1192	3,5184	17,144
Média	0,4996	0,45104	0,41192	0,35184	0,4286
Variância	0,008377322	0,0010085	0,0008291	0,00043346	0,0054611
<i>Total</i>					
Contagem	40	40	40	40	
Soma	22,449	21,9498	17,8298	17,1356	
Média	0,561225	0,548745	0,445745	0,42839	
Variância	0,009420076	0,01441493	0,0018815	0,00357292	