



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO DE GARRAFAS NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

RODRIGO SEIXAS DOURADO LORDELO

FEIRA DE SANTANA - BA

Julho / 2018

RODRIGO SEIXAS DOURADO LORDELO

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO DE GARRAFAS NA
PRODUÇÃO DE ARGAMASSA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Washington Almeida Moura

FEIRA DE SANTANA - BA

Julho / 2018

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

Lordelo, Rodrigo Seixas Dourado

L863a Avaliação da utilização de residuo de vidro de garrafas na produção de argamassa./ Rodrigo Seixas Dourado Lordelo. – 2018.

102f.:il.

Orientador: Washington Almeida Moura

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

1.Argamassa. 2.Resíduo de vidro. 3.Reciclagem. I.Moura, Washington Almeida, orient. II.Universidade Estadual de Feira de Santana. III.Título.

CDU: 691.53

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO DE GARRAFAS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Rodrigo Seixas Dourado Lordelo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Feira de Santana, 16 de julho de 2018.

Aprovada por:

Prof. Dr. Washington Almeida Moura
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof.^a Dr.^a Mônica Batista Leite
(Universidade Estadual de Feira de Santana)

Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
(Universidade Federal do Espírito Santo)

AGRADECIMENTOS

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr. Washington Moura, pela disponibilidade e incentivo, pela análise crítica e recomendações, que contribuíram para o aumento da qualidade do presente trabalho de pesquisa.

Às Prof^{as}. Dr^a. Mônica Leite e Dr^a. Cintia Fontes, pela enorme contribuição na fase de creditação e pela disponibilidade no esclarecimento de dúvidas.

À Myrella Cerqueira e Uiliana Farias, pela disponibilização das instalações laboratoriais do Laboratório de Tecnologia da Universidade Estadual de Feira de Santana (LABOTEC-UEFS).

À Prof^a. Dr^a. Tereza Santos, pelo notável apoio na fase experimental.

À Ana Paula Gonçalves e Safira Rios, pelo apoio prestado durante a fase laboratorial realizada no LABOTEC-UEFS.

Às colegas Valquíria Santana e Ana Nataly Costa, pelo apoio nas fases de creditação e de realização dos ensaios, pelo companheirismo, solidariedade e amizade demonstrados ao longo desse trabalho de pesquisa.

Ao amigo, Prof. Dr. Evangivaldo Lima, pelo apoio e confiança, pelo incansável incentivo e pelas recomendações.

Aos meus pais, Roque Lordelo e Joelnice Dourado, pelo apoio, pela confiança, compreensão e incentivo depositados em mim, ao longo deste percurso.

Ao meu irmão, Roberto Lordelo, pelo apoio e confiança depositados.

À minha tia, Ana Célia Dourado, e aos meus tios, Luiz Dourado e Expedito Lordelo, pelo apoio e incentivo depositados em mim, durante esta importante etapa da minha formação.

Finalmente, mas com extrema importância, a todos os meus amigos e amigas que acompanharam esta importante fase do meu aprendizado, que contribuiu para o meu desenvolvimento pessoal e cultural.

À FAPESB pelo financiamento da bolsa de pesquisa e à CAPES pelo fomento de bolsas ao PPGCEA-UEFS.

A todos, agradeço novamente, a disponibilidade, a amizade, os conselhos e o carinho demonstrados ao longo desta importante etapa da minha formação.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO DE GARRAFAS NA PRODUÇÃO DE ARGAMASSA

Rodrigo Seixas Dourado Lordelo

Julho, 2018

Orientador: Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

A utilização de resíduos incorporados à materiais de construção vem sendo apontada como uma alternativa para destinação mais adequada dos resíduos sólidos. Dentre os resíduos gerados no Brasil, estão os de vidro. Menos da metade das embalagens de vidro produzidas no Brasil são recicladas. No presente trabalho foi avaliado a influência da utilização de resíduo de vidro de garrafas de cor marrom, triturado, como substituto parcial do agregado miúdo natural, na produção de argamassas. Os teores de substituição avaliados foram de 10, 20 e 30%, em massa, além da argamassa de referência (sem resíduo). Foram analisadas propriedades das argamassas no estado fresco (trabalhabilidade, massa específica e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, absorção de água, índice de vazios, massa específica e reatividade álcali-sílica). Os resultados dos ensaios indicaram que o uso de resíduo de vidro de garrafa, em substituição ao agregado natural, não alterou a fluidez das argamassas, mas diminuiu a densidade e aumentou o teor de ar incorporado. A incorporação do resíduo proporcionou aumento nas resistências à tração na flexão e à compressão, comparado à argamassa de referência. Com relação à possível reatividade álcali-sílica, verificou-se que as argamassas com o resíduo de vidro de garrafa não excederam o limite de expansão estabelecido conforme a NBR 15577-4 (ABNT, 2009). Com base nos resultados concluiu-se que é possível utilizar até 30% de resíduo de garrafa de vidro de cor marrom, em substituição ao agregado natural.

Palavras-chave: Argamassa, Resíduo de vidro, Propriedades das argamassas, Reciclagem.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF THE USE OF WASTE GLASS BOTTLES IN MORTAR PRODUCTION

Rodrigo Seixas Dourado Lordelo

July, 2018

Advisor: Prof. Dr. Washington Almeida Moura

Program: Civil Engineering and Environmental

The use of waste incorporated in building materials has been pointed out as an alternative for more adequate disposal of solid waste. Among the wastes generated in Brazil, are the glass. Less than half of the glass bottles produced in Brazil are recycled. In the present work the influence of the use of waste glass of brown bottles, crushed, as partial substitute of the natural sand, in the production of mortars was evaluated. The substitution contents evaluated were 10, 20 and 30%, by mass, in addition to the reference mortar (without waste glass). The properties of the mortars in the fresh state were evaluated (workability, specific mass and incorporated air content) and also in the hardened state (flexural tensile strength, compressive strength, water absorption, void index, specific mass and alkali-silica reactivity). The results of the tests indicated that the use of waste glass bottles, replacing the natural aggregate, did not alter the fluidity of the mortars, but decreased the density and increased the content of incorporated air. The incorporation of the waste provided an increase in the tensile strengths in flexion and compression, in relation to the reference mortar. With respect to the possible alkali-silica reactivity, it was verified that the mortars with the waste glass bottle did not exceed the expansion limit established in accordance with NBR 15577-4 (ABNT, 2009). Based on the results it was concluded that it is possible to use up to 30% of waste glass of brown bottles, replacing the natural sand.

Keywords: Mortar, Glass waste, Mortar properties, Recycling.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE QUADROS.....	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	15
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	15
2 O VIDRO.....	16
2.1 PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO VIDRO	16
2.2 ESTRUTURA DO VIDRO	18
2.3 A RECICLAGEM DO VIDRO.....	20
2.4 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA - RAS.....	22
2.4.1 Aspectos químicos da RAS	23
2.4.2 Fatores que influenciam na velocidade da RAS	25
2.4.3 Efeito da adição de materiais cimentícios na RAS	26
2.5 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS .	28
2.5.1 Utilização do resíduo de vidro em argamassas	28
2.5.1.1 Em substituição à areia	28
2.5.1.2 Em substituição ao cimento	41
2.5.2 Utilização de resíduo de vidro em concretos	51
2.5.2.1 Em substituição à areia	51
2.5.2.2 Em substituição ao cimento	54
2.5.3 Considerações sobre a influência da aplicação de resíduo de vidro em matrizes cimentícias	62

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	64
3.1 MATERIAIS	66
3.1.1 Cimento.....	66
3.1.2 Agregado natural.....	67
3.1.3 Resíduo de vidro de garrafa - RVG	68
3.1.3.1 Beneficiamento do RVG.....	68
3.1.3.2 Caracterização do RVG	69
3.1.3.2.1 Granulometria	69
3.1.3.2.2 Caracterização química, física e mineralógica.....	71
3.2 DOSAGEM E PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	72
3.2.1 Propriedades das argamassas no estado fresco	74
3.2.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido	74
4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	76
4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....	76
4.1.1 Densidade de massa	76
4.1.2 Teor de ar incorporado	78
4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	80
4.2.1 Resistência à tração na flexão	80
4.2.2 Resistência à compressão	83
4.2.3 Absorção por imersão e índice de vazios	86
4.2.4 Expansão devido à reação álcali-sílica.....	89
5 CONCLUSÕES.....	91
6.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	92
6 REFERÊNCIAS	93
APÊNDICES.....	99

APÊNDICE 1 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE DENSIDADE DE MASSA DAS ARGAMASSAS.....	99
APÊNDICE 2 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS.....	99
APÊNDICE 3 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS.....	100
APÊNDICE 4 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS.....	101
APÊNDICE 5 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DAS ARGAMASSAS.....	102
APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS EXPANSÕES POR REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA DAS ARGAMASSAS.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura molecular: (a) típica de uma estrutura cristalina de quartzo; (b) estrutura de vidro da sílica de vidro; e (c) Estrutura de silicatos de cálcio/sódio (Fonte: SHI e ZHENG, 2007)	19
Figura 2: Estrutura molecular do vidro com os materiais utilizados como fundentes (Fonte: MAIA, 2003)	20
Figura 3: Tipos de sílica. (a) Sílica amorfa, (b) sílica cristalina (MUNHOZ, 2007)	23
Figura 4: Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas (TURRIZIANI, 1986).....	24
Figura 5: Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (TURRIZIANI, 1986).....	25
Figura 6: Resultados de resistência: (a) à compressão e (b) à flexão das argamassas de referência e com resíduo de vidro de coloração marrom (Fonte: PARK; LEE, 2004)...	30
Figura 7: Estrutura de poros das argamassas aos 180 dias de cura (Fonte: CORINALDESI <i>et al.</i> , 2005).....	32
Figura 8: Curvas de distribuição granulométrica do agregado natural e dos resíduos de vidro (Fonte: DU; TAN, 2013a).....	37
Figura 9: Resultados da resistência à compressão (a) e à flexão (b) das argamassas com resíduo de vidro de coloração marrom, verde, transparente e mista, aos 28 dias de cura (Fonte: DU; TAN, 2013a)	38
Figura 10: Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de vidro e do cimento (MATOS; COUTINHO, 2012)	43
Figura 11: Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de vidro e do cimento (Fonte: SAUER, 2013).....	47
Figura 12: Curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro (PARGHI, ALAN, 2016).....	49
Figura 13: Micrografias dos concretos: (a) referência e (b) com 20% de resíduo (ampliação de 5000 vezes) (Fonte: ANTÔNIO, 2012)	56
Figura 14: Curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro (SIMÕES, 2013)	57
Figura 15: Curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro (ALIABDO; ELMOATY; ABOSHAMA, 2016)	60
Figura 16: Fluxograma do programa experimental	65

Figura 17: Curva granulométrica da areia utilizada	67
Figura 18: Difratoograma da areia utilizada.....	68
Figura 19: Aspectos do beneficiamento do RVG: (a) lavagem das garrafas; (b) garrafas após lavagem e secagem; (c) quebra das garrafas para trituração; (d) trituração no moinho de martelo acoplado; (e) RVG passante na peneira #6 mm	69
Figura 20: Composição granulométrica dos agregados.....	70
Figura 21: Curva granulométrica da fração fina do RVG	71
Figura 22: Difratoograma do RVG.....	72
Figura 23: Aspectos do ensaio de expansão por RAS: (a) barras imersas em solução; (b) medição.....	75
Figura 24: Efeito do teor de RVG na densidade de massa das argamassas produzidas .	77
Figura 25: Densidade de massa relativa das argamassas produzidas	77
Figura 26: Efeito do teor de RVG sobre o teor de ar incorporado das argamassas produzidas	79
Figura 27: Teor de ar incorporado relativo das argamassas produzidas.....	79
Figura 28: Comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão aos 28 dias e aos 90 dias de cura	81
Figura 29: Resistência à tração na flexão relativa aos 28 e 90 dias de cura.....	82
Figura 30: Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão aos 28 dias e aos 90 dias de cura.....	84
Figura 31: Resistência à compressão relativa aos 28 e 90 dias de cura.....	85
Figura 32: Comportamento das argamassas quanto a absorção de água.....	87
Figura 33: Comportamento das argamassas quanto ao índice e vazios.....	87
Figura 34: Comportamento das argamassas quanto a absorção de água por imersão....	88
Figura 35: Comportamento das argamassas quanto ao índice de vazios.....	88
Figura 36: Expansões por RAS das argamassas.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química típica do vidro	17
Tabela 2: Composição da mistura do vidro sodo-cálcico tipo <i>float</i> incolor	17
Tabela 3: Reciclagem de embalagens de vidro no mundo	22
Tabela 4: Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de garrafas	23
Tabela 5: Composição granulométrica do resíduo de vidro	23
Tabela 6: Composição química do resíduo de vidro de construção e demolição	25
Tabela 7: Distribuição granulométrica, propriedades físicas e concentração de chumbo dos agregados	27
Tabela 8: Granulometria do agregado natural e do resíduo de vidro	28
Tabela 9: Composição química e propriedades físicas dos agregados	31
Tabela 10: Granulometria e propriedades físicas dos agregados	33
Tabela 11: Composição química do resíduo de vidro LCD	35
Tabela 12: Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de para-brisa	37
Tabela 13: Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de garrafas	39
Tabela 14: Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de para-brisa	40
Tabela 15: Composição química do resíduo de vidro de garrafas	42
Tabela 16: Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de tubo catódico	45
Tabela 17: Granulometria dos agregados miúdos utilizados	46
Tabela 18: Propriedades do concreto no estado fresco	47
Tabela 19: Composição química do resíduo de vidro de lâmpadas fluorescentes	48
Tabela 20: Composição química do resíduo de vidros planos	49
Tabela 21: Distribuição granulométrica do resíduo de vidro	50
Tabela 22: Composição química do resíduo de vidro de para-brisa	51
Tabela 23: Composição química dos resíduos de vidro GP1 e GP2	52
Tabela 24: Composição química do resíduo de vidro de construção e demolição	53
Tabela 25: Caracterização do cimento CP II Z-32	67
Tabela 26: Características da areia utilizada no estudo	68
Tabela 27: Granulometria do RVG	71

Tabela 28: Composição química do RVG.....	72
Tabela 29: Resultados do ensaio de índice de consistência	74
Tabela 30: Médias de densidade de massa das argamassas produzidas	76
Tabela 31: Análise de variância para densidade de massa	76
Tabela 32: Teor de ar incorporado médio das argamassas produzidas	78
Tabela 33: Análise de variância para teor de ar incorporado	78
Tabela 34: Resultados de médias de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas.....	80
Tabela 35: Análise de variância para resistência à tração na flexão	81
Tabela 36: Resultados de médias de resistência à compressão das argamassas.....	83
Tabela 37: Resultados de ANOVA para a resistência à compressão das argamassas....	84
Tabela 38: Resultados de médias de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas produzidas	86
Tabela 39: Análise de Variância para absorção de água por imersão e índice de vazios	86
Tabela 40: Resultados individuais de densidade de massa das argamassas.....	100
Tabela 41: Resultados individuais de teor de ar incorporado das argamassas.....	100
Tabela 42: Resultados individuais de resistência à tração na flexão das argamassas.....	101
Tabela 43: Resultados individuais de resistência à compressão das argamassas.....	102
Tabela 44: Resultados individuais de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas.....	103
Tabela 45: Resultados das expansões por RAS das argamassas.....	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição a areia, na produção de argamassas.....	34
Quadro 2: Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento, na produção de argamassas	44
Quadro 3: Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição a areia, na produção de concretos	48
Quadro 4: Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento, na produção de concretos.....	55

1 INTRODUÇÃO

O atual modelo de produção tem influenciado nas alterações climáticas, pondo em risco a sustentabilidade, que é fundamental para manutenção de recursos que possibilitem a sobrevivência das futuras gerações (BARDINI; MARCHIORO, 2007; JOHN, 2000). A produção do cimento, por exemplo, é um processo que envolve alto consumo energético e elevada propagação de poluentes atmosféricos, contribuindo com a emissão global de CO₂, em uma taxa que varia de 5 a 8% (NAIK; MORICONI, 2005). Esta alta contribuição se dá pelo fato de que, para cada tonelada de cimento produzido, uma tonelada de CO₂ é lançada na atmosfera, proveniente do uso de combustíveis e aquecimento dos materiais usados (PADE; GUIMARÃES, 2007).

Outro agravante é que o crescimento industrial mundial, impulsionado pelos avanços científicos e tecnológicos, tem contribuído com o aumento do consumismo. Como consequência tem-se elevado o consumo de matéria-prima e o aumento da geração de variados tipos de resíduos, muitos deles danosos ao meio ambiente. A grande geração de resíduos implica em dificuldades para a disposição adequada dos mesmos. Assim, para reduzir os impactos decorrentes da geração de resíduos é necessária a implementação de um modelo de gestão que consista, primeiramente, na redução da geração de resíduo na fonte. Caso não seja possível evitar a geração, os resíduos devem ser reciclados, reutilizados, incinerados com recuperação de energia ou depositados adequadamente em aterros. Do ponto de vista legal e ambiental, em todo o mundo, o maior rigor da legislação ambiental requer a exigência de uma destinação final adequada para o resíduo gerado (JOHN, 2000).

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos (2016), no Brasil é gerado anualmente cerca de 78,3 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) e 58,4% desse total é encaminhado para aterros sanitários. De acordo com Prado (2007), o resíduo de vidro corresponde a 3% da geração total de RSU no Brasil.

Em 2007, foi produzido cerca de 980 mil toneladas de embalagens de vidro no Brasil. As embalagens de vidro utilizadas, em geral, no envase de diferentes produtos superam a metade da produção de vidro. Cerca de 47% das embalagens de vidro são recicladas no país. Atualmente, o mercado que mais contribui com o reaproveitamento deste resíduo é o das vidrarias (CEMPRE, 2016).

Com base nos critérios estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos de garrafas de vidro são classificados como sendo da classe II B – não perigosos e inertes, o que facilita o seu manuseio durante processos de separação, coleta e reciclagem.

Sendo o vidro um produto não biodegradável, que leva de 2 mil a 1 milhão de anos para se decompor, a sua disposição em aterros deve ser evitada. Vale salientar que o vidro pode ser reciclado indefinidamente, sem que ocorram alterações em suas características. A reciclagem deste material proporciona redução de custo no processo de produção, devido ao menor gasto energético, e do consumo de matéria-prima. No entanto, para que seja destinado aos processos usuais de reciclagem, o resíduo de vidro precisa passar por um processo de seleção, de acordo com a sua cor (incolor, verde e âmbar), e assim poderá ser utilizados na fabricação de novos recipientes de cor semelhante (ABIVIDRO, 2016). Quando vidros com cores diferentes se associam tornam-se impróprios para a utilização como embalagens, devendo, portanto, serem enviados para os aterros (MATA, 2010).

Alguns estudos foram desenvolvidos utilizando resíduos de vidro também na construção civil. Segundo Meyer (2009), os resíduos de vidro quando não são adequados para reciclagem com a finalidade de formar novos produtos de vidro, podem ser moídos ou mesmo pulverizados e incorporados em misturas cimentícias. Assim, pode-se contribuir para reduzir o consumo de matérias-primas naturais e energia e diminuir o volume de resíduo a ser depositado em aterros. De acordo com Shi e Zheng (2007), o vidro, devido às suas características físicas e composição química, pode ser considerado adequado para substituição parcial da areia e cimento, nas misturas cimentícias.

Embora alguns estudos tenham sido desenvolvidos buscando a utilização de resíduo de vidro em misturas cimentícias, percebe-se a falta de rigor científico e de dados para que os resultados sejam reproduzidos e apropriados pelo mercado.

Nesse contexto, o presente estudo propõe avaliar o uso de resíduo de vidro de garrafas, na produção de argamassa. Busca-se, desta forma, contribuir para a redução do impacto ambiental provocado pela deposição inadequada deste resíduo, tanto em áreas clandestinas quanto em aterros sanitários, o que reduz a vida útil destes. Outro aspecto importante é a possível redução da extração da areia, que também tem provocado degradação ambiental.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da utilização de resíduo de vidro de garrafas (RVG) como substituto parcial do agregado miúdo natural na produção de argamassa.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar o RVG a ser utilizado nas misturas, do ponto de vista químico e físico;
- Avaliar os efeitos do uso de diferentes percentuais de substituição do agregado natural por RVG, em propriedades da argamassa, no estado fresco (trabalhabilidade, densidade de massa e teor de ar incorporado) e no estado endurecido (resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, absorção de água, índice de vazios e expansão pela reação álcali-sílica).

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação foi estruturada em 6 capítulos, conforme apresentado a seguir.

- O capítulo 1 apresenta a introdução, na qual é feita uma contextualização do problema ambiental destacando a importância da reciclagem de resíduos, o que justifica a relevância deste estudo. São também apresentados neste capítulo os objetivos do referido estudo, bem como a estrutura da dissertação.
- No capítulo 2 é feita uma abordagem sobre a produção do vidro, as características físicas e químicas deste material, geração do resíduo de vidro no Brasil, reação álcali-sílica na presença de agregados reativos e a aplicabilidade do resíduo de vidro na produção de concreto e argamassa.
- No capítulo 3 é descrito o procedimento experimental: os materiais utilizados, processo de obtenção e beneficiamento do resíduo, processo de produção das argamassas e metodologia de determinação das propriedades avaliadas.
- O capítulo 4 trata da apresentação e discussão dos resultados.
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais.

2 O VIDRO

A palavra vidro refere-se aos sólidos amorfos, que ao se fundirem tornam-se líquidos viscosos e ao serem resfriados se enrijecem sem cristalizar. O vidro é uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao seu estado líquido, porém, devido à mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, possui um alto grau de viscosidade, de modo a ser, para todos os fins práticos, rígido (MAIA, 2003).

2.1 PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DO VIDRO

A produção de vidro é bastante antiga e sua descoberta ainda é um mistério, segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro – ABIVIDRO (2016). O historiador romano Plínio atribuiu a descoberta acidental aos fenícios, sendo que o vidro já era utilizado por egípcios, sírios, assírios, babilônicos, gregos e romanos. As peças de vidro mais antigas são provenientes do Egito (5000 a.C.). O primeiro grande desenvolvimento da indústria do vidro ocorreu por volta de 250 a.C., na Síria com a descoberta do método de produção de vidro por sopro (MAIA, 2003). Em escavações, realizadas em Bagdá, foram encontrados artefatos de vidro que datam de 2700 a.C. Desde então, a técnica de produção do vidro começou a ser aperfeiçoada e difundida. Sua composição básica não mudou muito em relação aos dias atuais. Porém, sua utilização é ampla e se desenvolve em diversos setores de produtos (ABIVIDRO, 2016).

De acordo com Sichieri, Caram e Santos (2007), o vidro é um produto fisicamente homogêneo, obtido pela fusão de diversas matérias-primas inorgânicas minerais, dentre as quais destacam-se a areia quartzítica (óxido de silício - SiO_2), a barrilha (carbonato de sódio - Na_2CO_3) e o calcário (carbonato de cálcio - CaCO_3). A tabela 1 mostra a composição química do vidro. Segundo os autores, o vidro enrijece sem cristalizar, através do aumento contínuo de viscosidade. Portanto não há estado sólido ou líquido e sim maior ou menor viscosidade, que varia em função da temperatura. Ou seja, o vidro é um material amorfo, que apresenta transição vítrea.

Tabela 1 Composição química típica do vidro

Composto	(%)
SiO ₂	72,0
Na ₂ O	14,0
CaO	9,0
Al ₂ O ₃	0,7
MgO	4,0
K ₂ O	0,3

Fonte: Guia do vidro (2016).

De acordo com a ABIVIDRO (2016), as diferentes composições químicas do vidro o classifica em três tipos:

- Vidro sodo-cálcico ou silicato soda-cal: é o tipo de vidro mais comum, utilizado em embalagens de forma geral (garrafas, potes, entre outros) e como vidro plano, aplicado na indústria automobilística, construção civil e em eletrodomésticos. É constituído principalmente por óxido de silício (SiO₂), óxido de sódio (Na₂O) e óxido de cálcio (CaO), podendo sofrer pequenas variações em sua composição química para modificação da cor ou de alguma propriedade específica.
- Vidro boro-silicato: é utilizado em utensílios domésticos resistentes a choques térmicos, por possuir baixa expansão térmica.
- Vidro ao chumbo: é utilizado em peças que requerem maior brilho, função atribuída à adição de chumbo, como copos, taças, cálices, ornamentos, etc.

Segundo a ABIVIDRO (2016), o vidro sodo-cálcico pode ser obtido pelo processo de fabricação *float* ou estirado, podendo ser beneficiado e transformado em materiais como garrafas e vidros planos (laminado, temperado e espelho). A composição básica para fabricação deste tipo de vidro está apresentada na tabela 2.

Tabela 2 Composição da mistura do vidro sodo-cálcico tipo *float* incolor

Mistura Vitrificável	Compostos minerais				Compostos químicos	
	SiO ₂ (areia)	CaCO ₃ (calcário)	CaMg(CO ₃) ₂ (dolomita)	Na ₂ O.Al ₂ O ₃ (feldspato)	Na ₂ CO ₃ (barrilha)	Na ₂ SO ₃
100%	57,46%	10,56%	9,88%	2,96%	16,46%	2,96%

Fonte: Sichieri, Caram e Santos (2007).

No Brasil, em 2006, a capacidade instalada para produção de vidros sodo-cálcicos, para os vários setores das atividades industriais (construção, automóvel, móveis, alimentos, bebidas, etc.), foi de 3,1 milhões de toneladas. Desta produção, cerca de 2,6

milhões de toneladas de vidro foram vendidos. Os vidros sodo-cálcicos como os vidros planos, de embalagens e de uso doméstico, representam 90% desta capacidade instalada. Só os vidros planos representaram 1,24 milhões de toneladas de capacidade instalada em 2006. O vidro *float* atingiu 57% do consumo na construção civil (ROSA *et al.*, 2007).

A fabricação do vidro envolve um processo que requer muita energia. Consiste basicamente em duas etapas: fundir as matérias-primas e resfriá-las na forma pretendida (APA, 2016). De acordo com Rosa *et al.* (2007), o consumo per capita do vidro no Brasil é de 12 kg/hab/ano.

Os vidros coloridos são produzidos acrescentando-se corantes como o selênio (Se), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de cobalto (Co_3O_4), influenciando assim na sua composição química (GUIA DO VIDRO, 2016).

Os procedimentos de fabricação do vidro podem ser divididos em quatro fases principais: mistura e fusão da matéria-prima, conformação ou moldagem, recozimento e acabamento. A conformação do vidro pode ser feita pelos métodos de prensagem (obtendo-se peças de paredes grossas como pratos e tigelas), sopro (utilizado na produção de materiais de geometria complexa como garrafas e lâmpadas), estiramento ou vidro *float* (utilizado na produção de laminados como para-brisa) e fibra de vidro contínua (obtendo-se fibra ou lã de vidro). O recozimento resulta na diminuição da tensão interna adquirida em função da grande diferença da taxa de resfriamento do vidro (exterior e interior). O acabamento consiste na limpeza, lapidação, esmaltamento, graduação e calibração das peças (EMHART GLASS, 2017).

2.2 ESTRUTURA DO VIDRO

Há grande semelhança entre os cristais e o vidro, no que se refere à dureza, transparência, condutividade térmica e outras propriedades. Além disso, é necessário relativamente pouca energia para converter um cristal em vidro. Pode-se concluir, portanto, que as ligações que existem no vidro são iguais às ligações das estruturas cristalinas dos silicatos. A diferença é que na estrutura cristalina cada tetraedro tem uma posição determinada, repetitiva e simétrica e no caso do vidro esta estrutura é desordenada, não repetitiva e varia de acordo com a história térmica do vidro, ou seja, a velocidade em que se deu o seu resfriamento (CALLISTER, 2002).

De acordo com Callister (2002), o vidro pertence ao grupo familiar dos materiais cerâmicos, sendo formado por silicatos não-cristalinos. Possui, assim, uma estrutura molecular sem arranjo regular, de acordo com a ilustração da figura 1.

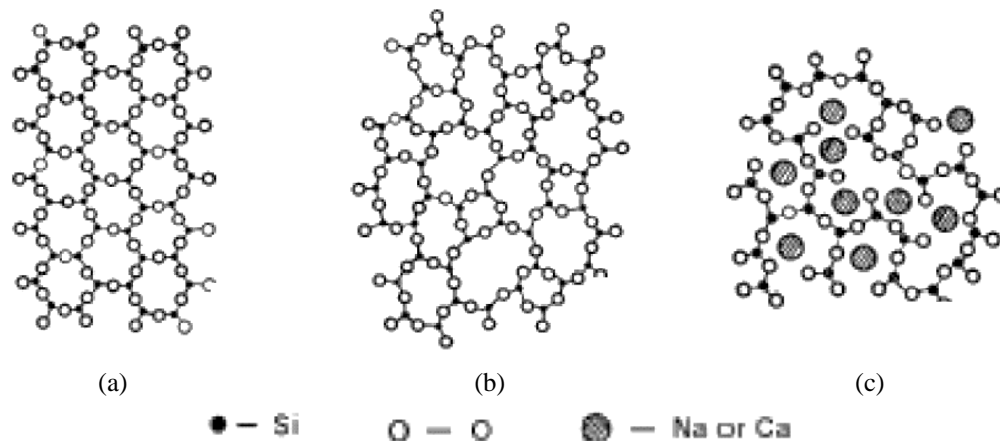


Figura 1 Estrutura molecular: (a) típica de uma estrutura cristalina de quartzo; (b) do silicato amorfo; e (c) de silicatos de cálcio/sódio (Fonte: SHI; ZHENG, 2007)

Na figura 1 nota-se que a formação de silicatos de cálcio e sódio (vidro sodocálcico) se configura na amorfização do cristal de quartzo, possibilitando assim, uma maior solubilidade desses átomos (SHI; ZHENG, 2007).

Os óxidos comumente encontrados na composição do vidro são classificados como vidro-formadores (SiO_2 , B_2O_3 , GeO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 e AsO_3), intermediários (Al_2O_3 , Sb_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , PbO , BeO , ZnO) e modificadores (MgO , Li_2O , BaO , CaO , SrO , Na_2O e K_2O). Quanto à função desses óxidos no processo de fabricação do vidro, a classificação é feita em vidro-formadores, estabilizadores, fluxos ou fundentes e acessórios (MAIA, 2003).

Os óxidos fundentes têm a função de baixar a temperatura de fusão da mistura de matérias-primas. Por outro lado, sua utilização propicia perda de resistência química, podendo ser corrigida com a incorporação dos óxidos estabilizadores. Dentre os fundentes empregados pode-se citar o Na_2O , CaO , Al_2O_3 , Li_2O e K_2O (MAIA, 2003).

A estrutura molecular do vidro com fundentes pode ser observada na figura 2.

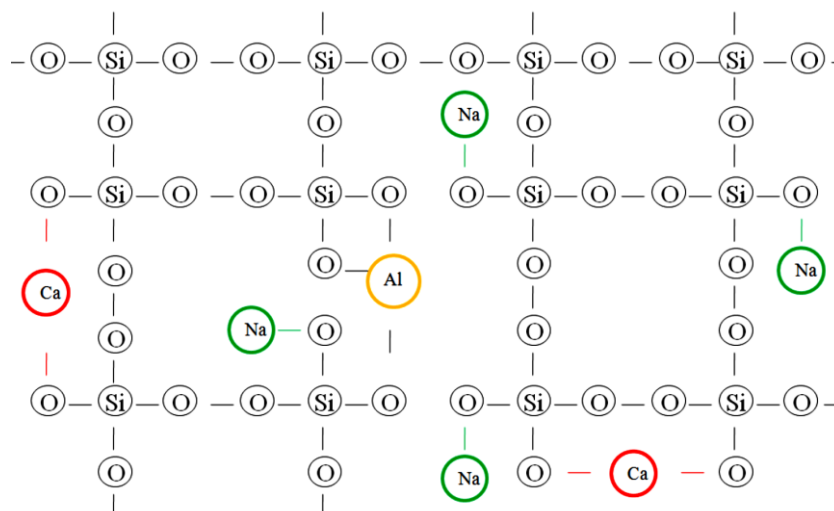


Figura 2 Estrutura molecular do vidro com os materiais utilizados como fundentes (Fonte: MAIA, 2003)

Observando-se a figura 2, é possível verificar a formação dos óxidos de alumínio, cálcio e, em maior concentração, os óxidos de sódio, que reagem com o oxigênio do SiO_2 . Estes óxidos, classificados como fundentes, são responsáveis pela redução da temperatura de fusão das matérias-primas no processo de produção do vidro (MAIA, 2003).

Quanto as características físicas do vidro *float* (SICHERI, CARAM e SANTOS, 2007):

- Massa específica = $2500 \pm 50 \text{ kg/m}^3$;
- Dureza = $\pm 6,5$ Mohs;
- Módulo de elasticidade = $75.000 \pm 5000 \text{ MPa}$;
- Tensão de ruptura à flexão = $40 \pm 5 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson = 0,22;
- Coeficiente de Dilatação = $9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
- Calor específico entre 20°C e 100°C = $0,19 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$;
- Coeficiente de condutibilidade térmica a 20°C = 0,8 a 1 kcal/mh $^\circ\text{C}$.

2.3 A RECICLAGEM DO VIDRO

A indústria de vidro é uma consumidora importante de matérias-primas minerais não metálicas, também conhecidos como minerais industriais. O vidro tem características específicas de resistência e propriedades mecânicas, térmicas, óticas e acústicas que possibilitam aplicações diversas em variados segmentos industriais e é geralmente

classificado em quatro grupos: embalagens, planos, especiais (técnicos) e domésticos (MME, 2011).

As embalagens de vidro são consumidas, em maior volume de utilização, no setor de bebidas, em frascos e garrafas, principalmente para cervejas; no setor de alimentos e na embalagem de produtos não alimentícios (farmacêuticos e cosméticos). Os vidros planos (correspondendo a 90% da produção mundial) são utilizados, principalmente, pela construção civil, seguida pela indústria automobilística, moveleira, e decorações de interiores. As lãs e fibras de vidro (para isolamento e indústria têxtil), os isoladores elétricos de vidro (para televisores e monitores), blocos de vidro e os bulbos de lâmpadas são considerados vidros especiais (técnicos). Destacam-se também os vidros domésticos que são utilizados em utensílios como louças de mesa, copos, xícaras, e objetos de decoração como vasos (ABIVIDRO, 2016).

A incorporação de resíduo de vidro nas matérias-primas, para a produção do vidro, tem adquirido importância em todo o mundo, devido a questões ambientais e econômicas. Do ponto de vista ambiental, a utilização de resíduo de vidro reduz consideravelmente os resíduos sólidos associados, provenientes, principalmente, de embalagens descartáveis. Ainda do ponto de vista ambiental, a utilização desse resíduo também possibilita reduzir o consumo energético no processo de fabricação e diminuir os problemas de poluição ambiental. Do ponto de vista econômico, a utilização do resíduo reduz as dificuldades na extração e utilização dos minerais que constituem as matérias-primas do vidro (MATA, 2010).

De acordo com o Panorama Setor de Vidro (2015), para cada 10% de pedaços de vidro na mistura economiza-se de 3 a 4% da energia necessária para a fusão nos fornos industriais, além de reduzir até 10% a utilização de água. Vale salientar que o consumo médio de água na indústria vidreira é cerca de 1,0 m³/t.

Ainda segundo o Panorama Setor de Vidro (2015), no ano de 2011, a quantidade de embalagem de vidro reciclada no Brasil foi estimada em 47%, sendo assim, a maior parte dos resíduos de vidro tem como destinação a deposição em lixões e aterros sanitários. Desta forma, percebe-se que a preocupação com gestão de resíduos é relativamente pequena no Brasil, quando comparado a outros países da Europa. Na tabela 3 são apresentados os índices de reciclagem de embalagens de vidro em diversos países europeus.

Tabela 3 Reciclagem de embalagens de vidro em alguns países

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

Fonte: MME (2011).

Pode-se observar que, em 2011, dentre os países que apresentam os maiores índices de reciclagem de embalagens de vidro, destaca-se a Bélgica, que alcançou 96%. O Brasil se encontra bastante distante do índice de reciclagem apresentado pela maior parte dos países. Este cenário justifica a preocupação com a busca de possibilidade de reciclagem do resíduo do vidro no Brasil.

Como pode-se observar na tabela 1 e na figura 1, o vidro é composto por sílica amorfa e por um alto teor de álcalis (Na_2O e K_2O). O que justifica uma preocupação caso o resíduo de vidro venha a ser utilizado em matrizes cimentícias, devido a possibilidade de desenvolver reação álcali-sílica, conforme apresentado no item a seguir.

2.4 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA - RAS

A reação química entre os constituintes da sílica reativa do agregado e os hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) da pasta de cimento hidratada, é conhecida como Reação Álcali-Sílica (RAS). Assim, com o ataque aos materiais silicosos dos agregados por estes hidróxidos presente na solução dos poros, forma-se um gel expansivo que, na presença de umidade, pode, eventualmente, causar expansão e desagregação da pasta de cimento hidratada (DIAMOND, 1975; GLASSER; KATAOKA, 1981a; 1981b).

A reatividade potencial de um agregado é influenciada pela sua estrutura mineral e por suas características morfológicas. Desta forma, quanto maior for a desorganização e a instabilidade das formas de sílica presentes no agregado, assim como, quanto maior for a superfície específica deste agregado, mais elevado será o potencial de ocorrência da

RAS. Em ordem decrescente de reatividade encontram-se os minerais com estrutura amorfa (opala e vidro) (figura 3(a)), microcristalina a criptocristalina (calcedônia), metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados) (figura 3(b)) (GLASSER, 1992).

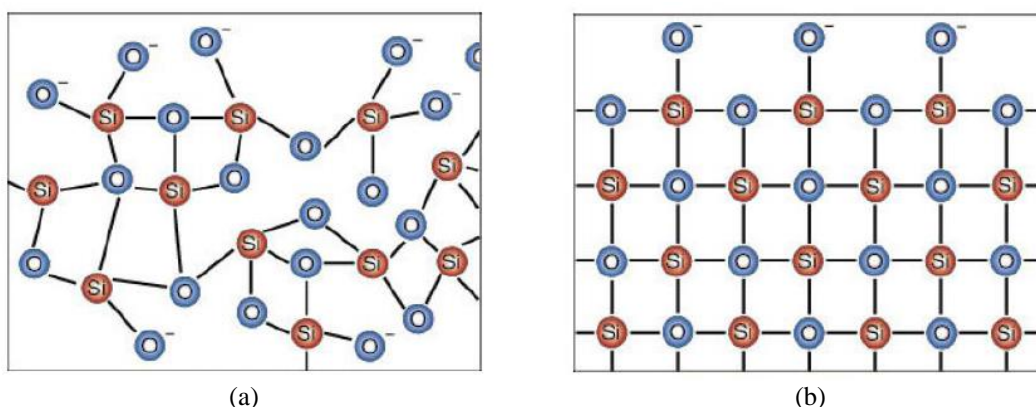
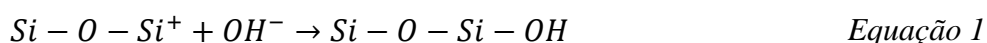


Figura 3 Tipos de sílica: (a) sílica amorfa e (b) sílica cristalina (Fonte: MUNHOZ, 2007)

De acordo com Glasser e Kataoka (1981a), o ataque dos íons hidroxila ocorre principalmente na superfície da sílica, à medida que os íons de sílica se dissociam na solução de poros, caracterizando um processo lento. No entanto, a sílica amorfa permite a penetração dos íons hidroxilas (OH^-) e alcalinos (Na^+ ou K^+) no interior de seu arranjo estrutural, causando a ruptura das ligações do grupo siloxano ($\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$), formando um gel álcali-silicato de caráter expansivo mais rapidamente.

2.4.1 Aspectos químicos da RAS

De acordo com Glasser (1992), a RAS pode ser dividida em dois estágios. No entanto, em uma etapa precedente, os íons hidroxila (OH^-), responsáveis pelo elevado pH da solução dos poros da matriz cimentícia, reagem com a superfície da sílica presente no agregado formando ligações do tipo silanol ($\text{Si} - \text{OH}$), para então dar início aos estágios da reação, conforme a equação 1.



O primeiro estágio da reação consiste no ataque dos íons hidroxilas (OH^-), presente na solução de poros, ao grupo silanol ($\text{Si} - \text{OH}$) (figura 4), presente na superfície da sílica. Fica caracterizado uma reação do tipo ácido-base, em que a sílica adquire um

caráter ácido (SiO^-) e a solução dos poros, básico, conforme descrito pelas equações 2 e 3.

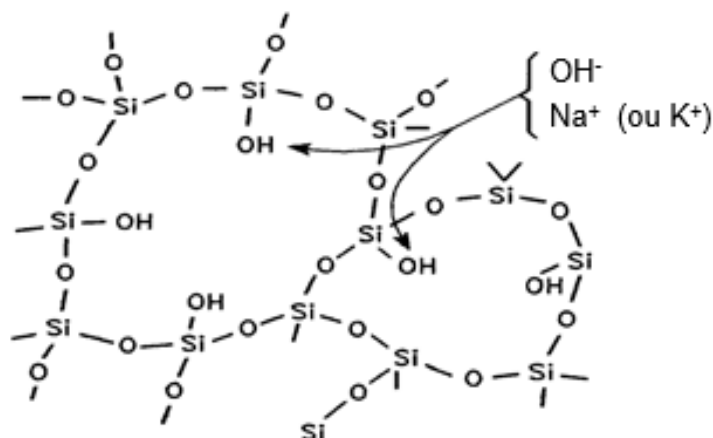
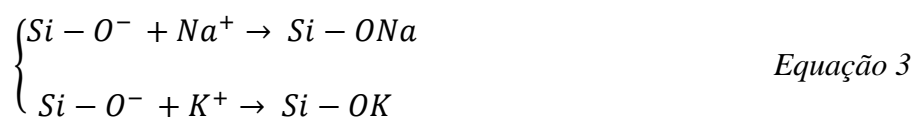
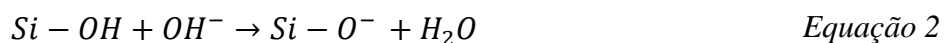
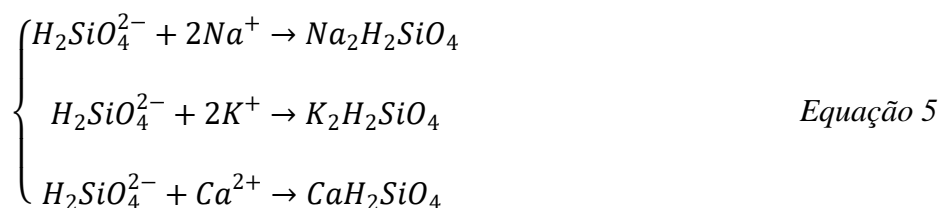
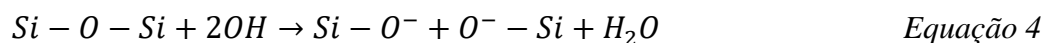


Figura 4 Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas (Fonte: TURRIZIANI, 1986)

Os íons hidroxila em excesso também atacam, em um segundo estágio, as ligações mais internas da sílica, o grupo siloxano ($\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$), rompendo as suas ligações e substituindo-o por pares de SiO^- , conforme descrito na equação 4 e apresentado na figura 5, levando à desintegração da estrutura da sílica. Dessa forma, em um ambiente com alto pH, o silicato solúvel que representa o ácido ortosilícico (H_2SiO_4) fica em solução, possibilitando a adsorção de água e dos íons alcalinos (equação 5).



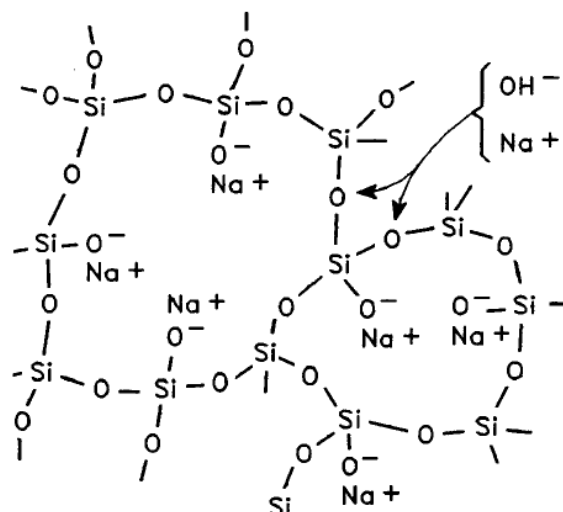


Figura 5 Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas (Fonte: TURRIZANI, 1986)

A neutralização das ligações do grupo silanol e a ruptura das ligações do grupo siloxano, pelas hidroxilas, seguido do balanceamento de cargas entre os ânions provenientes das formas de sílica reativa e os cátions presentes na solução de poros, o sódio (Na^+) e o potássio (K^+), conforme apresentado nas equações anteriores, tem como resultado a formação de um gel de caráter expansivo, pois absorve água com uma tendência de acréscimo de volume. Devido ao gel estar confinado entre a pasta de cimento hidratada surgem pressões internas que podem, eventualmente, causar expansão, fissuração e desagregação da pasta de cimento hidratada (NEVILLE, 2015).

2.4.2 Fatores que influenciam na velocidade da RAS

De acordo com os estudos realizados por Diamond (1975) e Glasser e Kataoka (1981a,b), a forma com que os principais fatores interferem na velocidade da RAS, de uma forma geral, são:

- quanto maiores o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento, maiores serão as expansões;
- para um determinado teor de álcalis no cimento, a expansão será maior quanto mais fino for o cimento;
- quanto mais desorganizada e instável é a estrutura do mineral presente no agregado, mais reativo será o material;
- a reatividade do agregado também é influenciada por sua dimensão e porosidade, que influenciam a área onde a reação pode ocorrer. De acordo com Diamond

(1975), partículas de sílica reativa com uma faixa granulométrica entre 20 e 30 μm podem gerar expansão em um período de um a dois meses, enquanto que, para dimensões maiores, as reações ocorrem somente após vários anos;

- em ambientes com umidade relativa acima de 80%, ocorre um aumento na magnitude da reação. Por outro lado, na falta de água ou umidade, a RAS pode ser limitada, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis;
- em geral, uma temperatura mais elevada acelera o progresso da RAS, embora não aumente a expansão total causada por ela;
- a permeabilidade da pasta de cimento hidratada também influencia o progresso da RAS, devido ao controle que ela exerce sobre o fluxo de água e de vários íons, bem como do gel de sílica.

Desse modo, são três os fatores que, quando ocorrem de forma simultânea, condicionam a ocorrência da RAS em materiais cimentícios, sendo eles: a presença de um agregado reativo; o teor elevado de hidróxidos alcalinos (NaOH e KOH) na solução de poros; e a presença de umidade suficiente. Sendo assim, na ausência de um destes fatores, a RAS não ocorrerá (GLASSER, 1992).

2.4.3 Efeito da adição de materiais cimentícios na RAS

Sabe-se que a adição de materiais cimentícios, tais como cinzas volantes, escória, metacaulin e sílica ativa em concretos e argamassas foram utilizados com sucesso para mitigar a expansão provocada pela RAS. De acordo com Shehata e Thomas (2000), este processo de mitigação pode ocorrer de quatro formas: diluição dos álcalis; maior retenção dos álcalis na estrutura do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto da reação pozolânica; redução da permeabilidade; redução do pH da solução dos poros. Os autores explicam, conforme apresentado a seguir.

- **Diluição dos álcalis:** a diluição dos álcalis ocorre à medida que o cimento é substituído pelo material pozolânico, desde que o teor de álcalis das adições seja menor que o do cimento. No entanto, nem todos os álcalis presentes nas pozolanas estão disponíveis na solução dos poros para a RAS.
- **Retenção dos álcalis no C-S-H:** o silicato de cálcio hidratado, formado a partir da reação do hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento com as pozolanas, possui uma relação CaO/SiO_2 menor que o C-S-H produzido pela

hidratação do clínquer do cimento, favorecendo a incorporação dos álcalis em sua estrutura, prevenindo a sua reação com a sílica reativa.

- **Redução da permeabilidade:** as adições de pozolanas reduzem a permeabilidade da matriz cimentícia através do refinamento do tamanho dos poros, tornando-a mais densa, reduzindo o ingresso de umidade e a difusão dos álcalis para reagirem com a sílica reativa.
- **Diminuição do pH:** a reação entre a sílica reativa do material pozolânico e o hidróxido de cálcio, reduz o pH da solução de poros, inibindo a RAS, uma vez que esta reação se desenvolve em um meio de maior alcalinidade.

De acordo com Chappex e Scrivener (2012a), o papel das adições ricas em alumina no controle da RAS ainda é pouco esclarecido. Segundo os autores, a alumina presente em certas adições não reduz ainda mais a alcalinidade da solução de poros da pasta. Shehata e Thomas (2000) e Ramlochan *et al.* (2004) também obtiveram resultados semelhantes quanto ao pH da solução de poros e controle da RAS com a utilização de cinza volante e escória de alto forno, respectivamente.

Ainda segundo Chappex e Scrivener (2012b), misturas contendo adições de materiais cimentícios ricas em alumina expandem menos devido a RAS do que aquelas contendo apenas adições ricas em sílica. O efeito do alumínio foi verificado através de um estudo de expansão de barras de argamassa (0,6 M NaOH; 60 °C) e análise de imagem SEM dos agregados reativos em soluções de poros simuladas. Os autores atribuem o ocorrido à presença da alumina na solução dos poros, sendo absorvida na superfície da sílica, limitando assim, a dissolução da sílica amorfa dos agregados, restringindo a RAS.

Em um estudo realizado por Afshinnia e Poursaei (2015), avaliou-se o efeito da utilização de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) na mitigação da RAS em argamassas com agregado altamente reativo. O RCV, proveniente de tijolos, foi utilizado em substituição ao cimento (CPI) nos teores de 10, 25 e 50%. O tamanho médio das partículas do RCV foi 40 µm. Os autores reportaram que para os teores de substituição 10, 25 e 50% de cimento por RCV, os valores de expansão da RAS reduziram em 31, 67 e 95%, aos 28 dias, respectivamente. Segundo os autores, o gel expansivo nas argamassas contendo o RCV tem menor viscosidade, diminuindo a pressão sobre a matriz circundante.

De forma semelhante, Guillante *et al.* (2017) desenvolveram um estudo que avaliou o efeito da combinação da cinza de casca de arroz (CCA) e do resíduo de cerâmica

vermelha (RCV) na mitigação da RAS em argamassas. O teor de substituição adotado foi de 20%. O traço das misturas foi de 1:2,25, em massa, e a relação água/cimento igual a 0,47. Os autores reportaram redução da expansão devido a RAS das argamassas com a referida substituição do agregado natural por um resíduo composto por 10% de CCA e 10% de RCV. Os autores atribuem o resultado ao teor de alumina presente no RCV.

Embora não apresente caráter cimentante, o LiNO_3 é considerado como a forma mais eficaz de lítio para a prevenção da RAS, mesmo quando usado em quantidades relativamente pequenas (FENG *et al.*, 2005). Segundo Tremblay *et al.* (2010), a adição de LiNO_3 requerida depende do teor de sódio (Na) e do teor de potássio (K) do cimento e dos agregados.

A maneira como o lítio impede a RAS não está clara. De acordo com Tremblay *et al.* (2010), o mecanismo que melhor explica a eficácia do LiNO_3 contra a RAS é a maior estabilidade química da sílica devido a diminuição do pH e outras mudanças na composição química da solução de poros, aliado à formação precoce de um revestimento protetor nas fases reativas que revestem os grãos reativos de sílica ou partículas agregadas, o que poderia atuar como barreira física contra a difusão de íons da pasta de cimento e, conseqüentemente, reduzindo ou mesmo impedindo a RAS.

2.5 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Tem-se realizado estudos com a utilização do resíduo de vidro em substituição ao agregado miúdo e ao cimento em misturas cimentícias. A seguir serão apresentados relatos de estudos utilizando o resíduo de vidro em argamassa e em concreto. Para subsidiar a discussão dos resultados da presente pesquisa, nesta revisão serão abordados os estudos de autores que utilizaram o resíduo de vidro em substituição ao agregado.

2.5.1 Utilização de resíduo de vidro em argamassas

2.5.1.1 Em substituição à areia

Park e Lee (2004) desenvolveram um estudo experimental que avaliou os efeitos da utilização de resíduo de vidro de garrafas, nas cores verde e marrom, substituindo parcialmente a areia, na produção de argamassa. A composição química e as propriedades físicas do resíduo de vidro utilizado são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de garrafas

Propriedades	Tipo de resíduo		
	Vidro verde	Vidro marrom	
Composição química	SiO ₂ (%)	71,30	72,10
	Al ₂ O ₃ (%)	2,18	1,74
	Na ₂ O+K ₂ O(%)	13,07	14,11
	CaO+MgO(%)	12,18	11,52
	SO ₃ (%)	0,05	0,13
	Fe ₂ O(%)	0,60	0,31
	Cr ₂ O ₃ (%)	0,44	0,01
Propriedades físicas	Massa específica (g/cm ³)	2,50	2,52
	Absorção de água (%)	0,41	0,40

Fonte: Park e Lee (2004).

Verifica-se que na composição química há uma predominância do SiO₂, conforme esperado.

Na tabela 5 está apresentada a composição granulométrica do resíduo utilizado por Park e Lee (2004).

Tabela 5 Composição granulométrica do resíduo de vidro

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)
4,75	0
2,36	10
1,18	25
0,60	25
0,30	25
0,15	15

Fonte: Adaptado de Park e Lee (2004).

Verifica-se na tabela 5 que a composição granulométrica do resíduo é a mesma que é adotada no ensaio de RAS previsto pela ASTM C 1260.

Ainda segundo Park e Lee (2004), no estudo foi utilizado o cimento CP I e o traço de 1:2,25, em massa, com relação água/cimento igual a 0,47. Os teores de substituição foram 10, 20, 30, 50 e 100%. Os autores buscaram acelerar a velocidade da reação alcali-silica (RAS), através do aumento da concentração de álcalis e da temperatura. Para isso foi adotado um procedimento de cura para as argamassas, que consiste em realizar 1 dia de cura normal ao ar e 13 dias de cura imersa em uma solução de 1N NaOH, a 80 °C.

Foi avaliado também por Park e Lee (2004), o comportamento mecânico das argamassas, através dos ensaios de resistência à compressão e à flexão, aos 14 dias de cura. Na figura 6 está apresentado o comportamento das argamassas produzidas quanto à resistência.

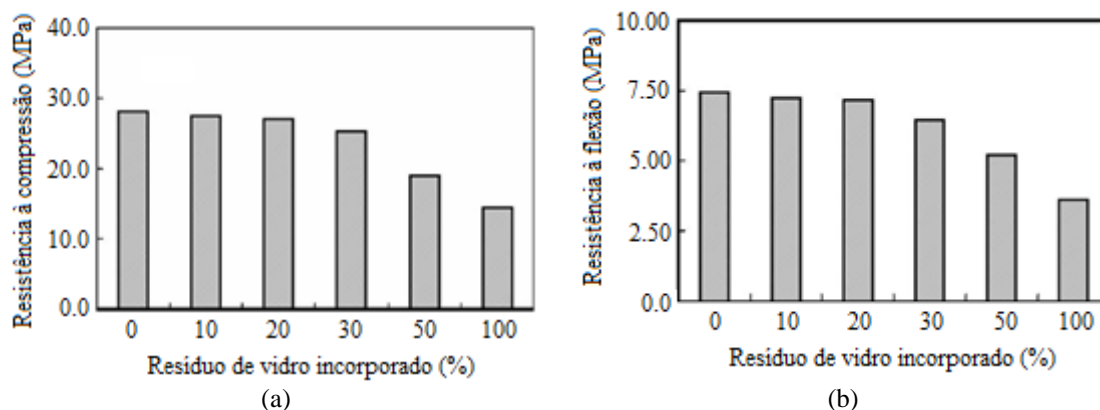


Figura 6 Resultados de resistência das argamassas de referência e com resíduo de vidro de coloração marrom: (a) à compressão; (b) à flexão, (Fonte: PARK; LEE, 2004)

Pode-se observar que as resistências à compressão e à flexão diminuíram gradualmente, com o aumento do teor de substituição do agregado natural pelo resíduo. A resistência à compressão reduziu até 49%, e a resistência à flexão chegou a reduzir 51%, para argamassa com 100% de resíduo de vidro substituindo a areia. Os autores justificaram a redução da resistência mecânica das argamassas com resíduo de vidro, devido ao surgimento das microfissuras, geradas pela expansão ocasionada pela RAS. Além disso, apontam a redução da adesão na interface da pasta de cimento e as partículas de vidro.

Quanto à expansão ocasionada pela RAS, Park e Lee (2004) notaram que todas as barras de argamassa, com exceção da argamassa com teor de 10% de resíduo de vidro marrom, excederam à taxa de expansão máxima admitida pela ASTM C 1260, que é de 0,2%. Os autores não justificaram esse comportamento. Os autores notaram ainda, que para os teores de substituição acima de 10%, as barras de argamassa contendo resíduo de vidro marrom apresentaram maior expansão do que as barras contendo resíduo de vidro verde. Justificaram este comportamento, pelo fato do vidro verde possuir na sua composição química maior teor do óxido de cromo (Cr_2O_3). Segundo os autores, este composto atua como um agente mitigador da RAS.

Corinaldesi *et al.* (2005) avaliaram a utilização de resíduo de vidro de construção e demolição em substituição à areia, na produção de argamassa. Os teores de substituição foram 30 e 70%, em massa. A composição química do resíduo de vidro utilizado neste estudo é apresentada na tabela 6.

Tabela 6 Composição química do resíduo de vidro de construção e demolição

Composição (%)	Resíduo de vidro de construção e demolição
SiO ₂	72,5
Al ₂ O ₃	1,7
Na ₂ O	12,2
CaO	12,0
MgO	0,2
K ₂ O	1,0

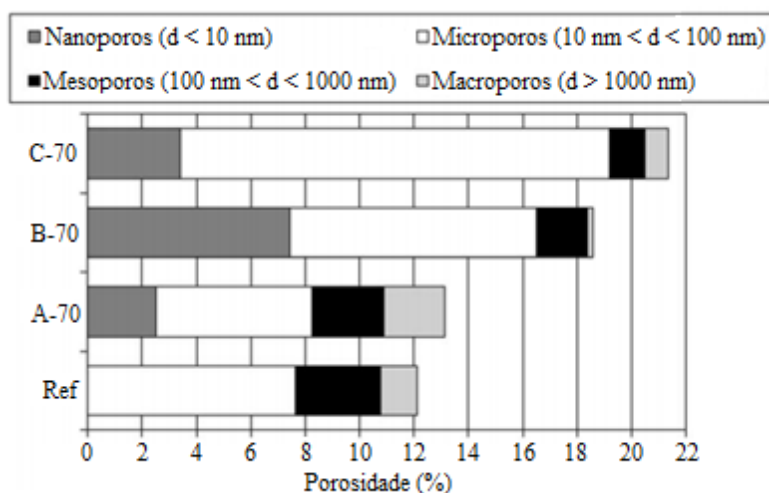
Fonte: Corinaldesi *et al.* (2005).

Verifica-se na tabela 6 que a composição química do resíduo de vidro utilizado neste estudo possui praticamente os mesmos teores de óxido de cálcio (CaO) e óxido de sódio (Na₂O).

Corinaldesi *et al.* (2005) utilizaram três frações granulométricas distintas para o resíduo de vidro: uma fração mais fina, com tamanho de partícula até 36 µm; uma média, com partículas variando entre 36 e 50 µm; e uma fração mais grossa, com partículas variando entre 50 e 100 µm. A areia utilizada neste estudo apresentou partículas com um tamanho de grãos superior a 50 µm. O cimento adotado para as misturas foi o CP II 42,5R e o traço foi de 1:3, em massa, com uma relação água/cimento de 0,56. Ao analisar a consistência das argamassas, notou-se que a incorporação do resíduo de vidro implicou em uma redução da trabalhabilidade, sendo ajustada com acréscimo na quantidade de água, de forma que as relações água/cimento adotadas para as argamassas com teores de 30 e 70% foram de 0,67 e 1,00, respectivamente. Os autores não justificaram este fato. Foi avaliado o comportamento mecânico das argamassas, através dos ensaios de resistência à compressão e à flexão, aos 180 dias. Também foi analisado a microestrutura das argamassas, através da intrusão de mercúrio, aos 180 dias de cura.

Segundo Corinaldesi *et al.* (2005), as argamassas com resíduo de vidro, mesmo possuindo uma maior relação água/cimento, apresentaram resistência superior a da argamassa de referência. O melhor resultado foi apresentado pela argamassa com 70% de resíduo na fração média (entre 36 e 50 µm). O aumento da resistência foi de cerca de 50%, em relação à argamassa de referência. Os autores atribuíram esse comportamento à melhora da microestrutura através do preenchimento dos macro e mesoporos, por parte das partículas do resíduo.

No que se refere à microestrutura, Corinaldesi *et al.* (2005) notaram que houve uma redução do tamanho médio dos poros das argamassas com a incorporação do resíduo de vidro, como pode-se observar na figura 7.



Nota: Ref: Referência; A-70: teor de 70% da fração fina do resíduo; B-70: teor de 70% da fração média; C-70: teor de 70% da fração grossa.

Figura 7 Estrutura de poros das argamassas aos 180 dias de cura (Fonte: CORINALDESI *et al.*, 2005)

De acordo com Corinaldesi *et al.* (2005), a utilização do resíduo, na fração média (entre 36 e 50 μm), provocou um maior grau de refinamento dos poros. Os autores notaram ainda que, embora as argamassas com resíduo de vidro tenham apresentado uma maior porosidade total, também apresentaram uma maior formação de nanoporos, conseqüentemente uma melhora da microestrutura. Portanto, segundo os autores, essa melhora da microestrutura está associada ao refinamento dos poros. Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que não houve efeito deletério da RAS sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade das argamassas, com a utilização de partículas de vidro com tamanho de até 100 μm .

Ling e Poon (2012) desenvolveram um estudo em que avaliaram a incorporação de resíduo vidro, como substituição parcial da areia, em argamassas. Foram utilizados três tipos de resíduo: tubos catódicos de televisores sem tratamento químico (n-TCT), com tratamento químico (TCT) e garrafas. O tratamento químico nos tubos catódicos foi realizado com a finalidade de remover o chumbo do resíduo. A granulometria, as propriedades físicas e a concentração de chumbo (Pb) dos agregados utilizados neste estudo são apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 Distribuição granulométrica, propriedades físicas e concentração de chumbo dos agregados

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)			
	Areia	n-TCT	TCT	Garrafas
5,00	0,5	0,1	0,8	0,4
2,36	2,4	12,9	26,7	12,6
1,18	10,2	41	56,9	46,5
0,60	24,7	71,4	81,1	72,4
0,30	60,5	92,4	95,5	87,3
0,15	96,3	99,4	99,7	94,9
Módulo de finura	1,94	3,17	3,61	3,14
Massa específica (g/cm ³)	2,62	3,1	2,99	2,49
Absorção de água (%)	0,87	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Pb (mg/L)	-	373,5	2,2	-

Nota: n-TCT: resíduo de tubo catódico e televisores sem tratamento químico; TCT: resíduo de tubo catódico e televisores com tratamento químico.

Fonte: Adaptado Ling e Poon (2012).

Nota-se na tabela 7 que o tamanho partículas dos agregados utilizados no estudo foi inferior a 5 mm. Observa-se ainda que com o tratamento do resíduo houve, de fato, uma grande redução na concentração de chumbo.

Segundo Ling e Poon (2012), o cimento utilizado foi o CEM I 52,5R e o traço da argamassa adotado foi de 1:2,5, em massa, com relação água/cimento de 0,45. Os teores de substituição da areia por resíduo foram de 50 e 100%, em volume. Os autores também substituíram 25% do cimento por cinza volante, em todas as misturas, com a finalidade de mitigar a RAS. Foram avaliadas a trabalhabilidade, as resistências à compressão e à flexão das argamassas, aos 1, 4, 7, 28 e 90 dias de cura, a absorção de água, aos 28 dias de cura, e RAS.

Ao analisar o espalhamento das argamassas, Ling e Poon (2012) notaram que a trabalhabilidade aumentou com a incorporação do resíduo de vidro, independentemente do tipo de vidro. Os autores atribuíram a melhora da fluidez das argamassas à superfície impermeável e lisa das partículas de vidro. No que se refere ao comportamento mecânico das argamassas, os autores observaram que a incorporação do resíduo diminuiu a resistência e justificaram a perda de resistência à menor adesão entre a superfície lisa do vidro e a pasta de cimento. Em relação à absorção de água, os autores constataram uma diminuição da porosidade das argamassas com a incorporação dos resíduos de vidro. Os autores atribuíram este resultado, à superfície impermeável das partículas de vidro. No

entanto, este comportamento não está coerente com os resultados de resistência mecânica obtidos no referido estudo.

Quanto à expansão ocasionada pela RAS, Ling e Poon (2012) verificaram que, embora a incorporação dos resíduos de vidro implicou no aumento da expansão, todas as argamassas apresentaram expansão inferior ao limite determinado pela ASTM C 1260. Os autores não justificaram esse comportamento. No entanto, deve-se levar em conta neste resultado a influência da cinza volante que provavelmente atuou como mitigador da RAS.

Penacho (2012) desenvolveu um trabalho no qual foi verificado a influência da substituição da areia por resíduo de vidro plano recozido, proveniente de demolição de edifícios, nas propriedades da argamassa. As granulometrias do resíduo de vidro e do agregado natural utilizados neste estudo foram inferiores a 4,8 mm, conforme verifica-se na tabela 8.

Tabela 8 Granulometria do agregado natural e do resíduo de vidro

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)	
	Areia	Resíduo de vidro
4,75	0,7	10,7
2,36	2,6	44,2
1,18	17,9	63,1
0,60	54,8	79,2
0,30	89,1	87,6
0,15	99,4	94,9

Fonte: Adaptado de Penacho (2012).

No estudo de Penacho (2012), o cimento utilizado foi o CEM II/B-L 32,5N. O traço foi 1:4, em volume, com relação água/cimento de 0,39. Os teores de substituição da areia pelo resíduo de vidro foram de 20, 50 e 100%, em volume. Foram avaliados a trabalhabilidade, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água por capilaridade e RAS.

De acordo com Penacho (2012), as argamassas com incorporação do resíduo apresentaram uma trabalhabilidade semelhante à argamassa de referência. O autor discute que, embora o resíduo de vidro possua maior superfície específica que a areia, o agregado natural absorve mais água quando comparado ao resíduo. No entanto, o tamanho de grãos do resíduo é maior se comparado a areia, logo o resíduo deve possuir menor superfície específica. Com relação às propriedades mecânicas das argamassas, avaliadas aos 28 e 90 dias, constataram um aumento do módulo de elasticidade dinâmico, da resistência à

compressão e da resistência à flexão, com o aumento do teor de substituição de areia por resíduos finos de vidro até o teor de 50%. O autor verificou ainda que o melhor resultado quanto à resistência à compressão foi apresentado pela argamassa com 50% do resíduo, a qual proporcionou um aumento de cerca de 16%, aos 28 dias, comparado com a argamassa de referência. O autor atribuiu esse comportamento das argamassas com resíduo a maior rigidez e, conseqüentemente, maior resistência do resíduo de vidro, comparado com a da areia, além da atividade pozolânica apresentada pelos finos do resíduo. O autor atribuiu a diminuição da resistência da argamassa com 100% do resíduo comparado a referência ao eventual desenvolvimento de microfissuras e diminuição da força de adesão entre a pasta e o agregado. Vale salientar, observando a granulometria apresentada, que o teor de finos apresentado pelo resíduo de vidro é muito pequeno para justificar atividade pozolânica.

Ao avaliar a retração por secagem, Penacho (2012) notou que as argamassas com até 50% de resíduo de vidro apresentaram valores de retração semelhantes à argamassa de referência. O autor atribuiu este resultado à atividade pozolânica do resíduo fino de vidro. Atividade essa que, como já foi dito, não se justifica. Por outro lado, a argamassa com teor de 100% de resíduo de vidro apresentou retração bem maior do que a argamassa de referência.

No que se refere aos resultados de absorção de água por capilaridade, Penacho (2012) observou que o coeficiente de absorção aumentou para as argamassas com resíduo de vidro. O autor atribuiu este resultado a maior conectividade entre os poros das argamassas com a incorporação do resíduo de vidro. Quanto à expansão ocasionada pela RAS, o autor notou que todas as barras de argamassa, com exceção da argamassa com teor de 100% de resíduo de vidro, não excederam a taxa de 0,2%, conforme estabelece a ASTM C 1260. Este comportamento foi atribuído a maior presença de sílica reativa na argamassa com 100% de resíduo.

Oliveira (2012) avaliou a influência da incorporação de resíduo de vidro laminado, como agregado, na produção de argamassas. A granulometria do resíduo de vidro foi inferior a 0,15 mm. O cimento utilizado foi o CEM II/B-L 32,5N. O traço das argamassas foi 1:4, em massa, com relação água/cimento de 1,41. Os teores de adição adotados foram 10, 15 e 20%. Foram avaliados a trabalhabilidade, o módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão e resistência à flexão, aos 28 e 90 dias, e absorção de água por capilaridade, aos 28 dias.

Com base nos resultados obtidos para o espalhamento, Oliveira (2012) constatou que a trabalhabilidade das argamassas aumentou com o acréscimo do teor de resíduo. Segundo o autor, as relações água/cimento das argamassas com 10, 15 e 20% de resíduo de vidro diminuíram 13,7, 16,5 e 18,5%, respectivamente. O autor atribuiu esta melhora da trabalhabilidade ao efeito de preenchimento dos vazios formados entre os grãos de areia pelos finos do resíduo de vidro.

Em relação aos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico, Oliveira (2012) observou uma melhora dessa propriedade, com o aumento do teor de resíduo de vidro incorporado, comparado à argamassa de referência. O autor notou que a argamassa com adição de 20% do resíduo apresentou um módulo de elasticidade dinâmico 74% superior ao da referência, para ambas idades. O autor atribui esse resultado a menor relação água/cimento das argamassas com resíduo, a maior compactação, além de um possível efeito pozolânico proporcionado pela fração fina do resíduo.

No que se refere à resistência à tração na flexão e a resistência à compressão, Oliveira (2012) comenta que as argamassas com incorporação de resíduo de vidro apresentaram melhor comportamento do que a argamassa de referência. O autor constatou que a argamassa com 20% de resíduo de vidro apresentou um aumento de 86% na resistência à tração e de 91% na resistência à compressão, aos 28 dias. Tendo sido o melhor comportamento.

No que se refere à absorção de água por capilaridade, Oliveira (2012) verificou um decréscimo do coeficiente de absorção de água por capilaridade com o aumento do percentual de resíduo na argamassa. A argamassa com 20% de resíduo apresentou uma redução de 52% no coeficiente, em relação à argamassa de referência.

Du e Tan (2013a; 2013b) avaliaram a substituição do agregado miúdo por resíduo de garrafas de vidro, na produção de argamassa. Foi utilizado resíduo de vidro de diferentes cores (marrom, verde, transparente e mista). A composição química e as propriedades físicas dos agregados utilizados neste estudo são apresentadas na tabela 9 e a granulometria na figura 8.

Tabela 9 Composição química e propriedades físicas dos agregados

Propriedades	Agregados				
	Vidro verde	Vidro marrom	Vidro transparente	Areia	
Composição química	SiO ₂ (%)	71,22	72,08	72,14	88,54
	Al ₂ O ₃ (%)	1,63	2,19	1,56	1,21
	Fe ₂ O ₃ (%)	0,32	0,22	0,06	0,76
	CaO(%)	10,79	10,45	10,93	5,33
	MgO(%)	1,57	0,72	1,48	0,42
	Na ₂ O(%)	13,12	13,71	13,04	0,33
	K ₂ O(%)	0,64	0,16	0,62	0,31
	TiO ₂ (%)	0,07	0,1	0,05	0,05
	Cr ₂ O ₃ (%)	0,22	0,01	-	-
Propriedades físicas	Massa específica (g/cm ³)		2,53		2,65
	Absorção de água (%)		0,07		1

Fonte: Du e Tan (2013a).

Nota-se na tabela 9 que a predominância é de sílica (SiO₂) nas amostras de vidro e areia. O teor de sílica é praticamente o mesmo (cerca de 72%), independente da cor do vidro.

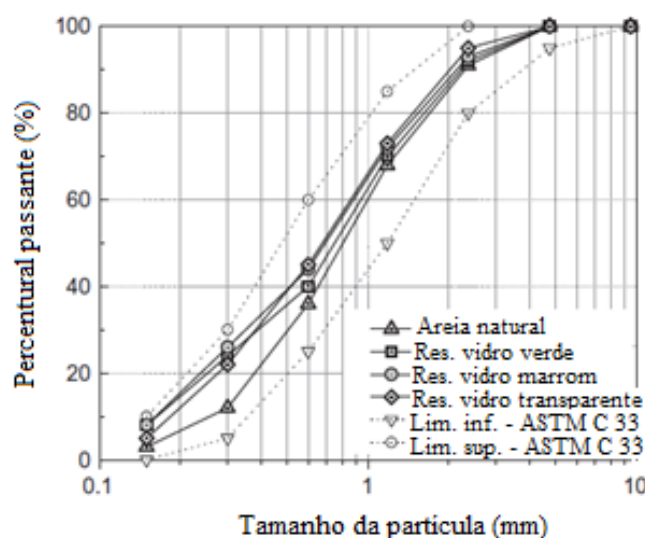


Figura 8 Curvas de distribuição granulométrica do agregado natural e dos resíduos de vidro (Fonte: DU; TAN, 2013a)

Observa-se que os agregados apresentam granulometria semelhante em relação a composição e limites de tamanho, no entanto a areia apresenta um menor teor de grãos com tamanho inferior a 0,6 mm se comparado aos resíduos.

No estudo, Du e Tan (2013a; 2013b) utilizaram cimento do tipo CP I. O traço da argamassa foi 1:2,25, em massa, com relação água/cimento de 0,47. Os teores de substituição adotados foram: 25, 50, 75 e 100%. Foram avaliadas a trabalhabilidade, as resistências à compressão e à flexão das argamassas, aos 28 dias de cura e a reação álcalis-

sílica (RAS). Com base nos resultados de espalhamento, foi constatado que a trabalhabilidade das argamassas diminuiu quanto maior o teor de resíduo presente. Os autores atribuíram esta redução ao formato angular das partículas de vidro.

A figura 9 mostra o comportamento mecânico das argamassas.

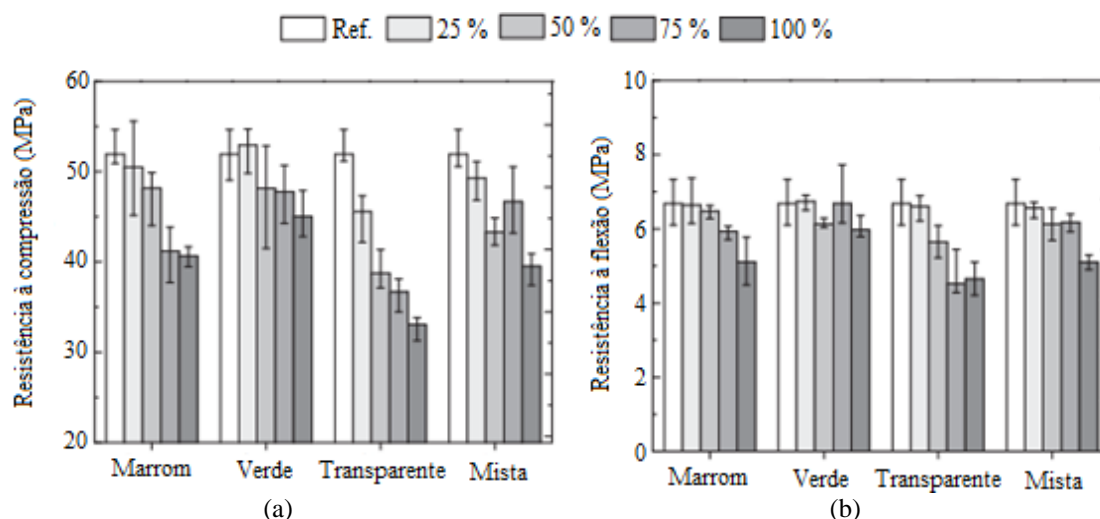


Figura 9 Resultados de resistência: (a) à compressão e (b) à flexão das argamassas, aos 28 dias de cura (Fonte: DU; TAN, 2013a)

Com base nos resultados, Du e Tan (2013a) verificaram que a resistência à compressão reduziu quanto maior foi o teor de substituição. Exceto para a argamassa com 25% de resíduo de garrafa verde, cuja resistência à compressão foi superior à da argamassa de referência. No que se refere aos resultados de resistência à flexão, de acordo com os autores, não houve diferença significativa entre a resistência à flexão da argamassa de referência e a argamassa com 25% de resíduo de vidro, independente da cor. A argamassa com 25% de resíduo de garrafa verde apresentou maior resistência à compressão do que a de referência. Os autores observaram também, que o pior comportamento foi das argamassas com resíduo de garrafas transparentes, tanto à compressão, quanto à flexão.

Quanto aos resultados dos ensaios de RAS, Du e Tan (2013b) constataram que apenas as barras de argamassa com resíduo de vidro transparente excederam o limite de expansão estabelecido pela ASTM C 1260. Os autores justificam este comportamento, ao fato do resíduo vidro transparente apresentar microfissuração decorrente do processo de trituração, tornando-se potencialmente deletério.

Zhao e Poon (2017) desenvolveram um estudo em que compararam as propriedades de argamassas com substituição parcial da areia por resíduo de vidro de tubo

catódico sem tratamento químico (n-TCT) e resíduo de vidro de tubo catódico com tratamento químico (TCT). A granulometria e as propriedades físicas dos agregados utilizados neste estudo estão apresentadas na tabela 10.

Tabela 10 Granulometria e propriedades físicas dos agregados utilizados

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)		
	Areia	n-TCT	TCT
5	0	0	0
4,75	0,94	7	0
2,36	5,18	24,63	0,86
1,18	14,01	47,9	41,97
0,6	33,52	75,17	80,43
0,3	67,48	92,62	95,15
0,15	97,45	99,34	99,25
Módulo de finura	2,15	3,38	3,18
Massa específica (g/cm ³)	2,62	3,04	2,98
Absorção de água (%)	0,87	≈ 0	≈ 0
Pb (mg/L)	-	373,5	2,2

Nota: n-TCT: resíduo de tubo catódico de televisores, sem tratamento químico; TCT: resíduo de tubo catódico de televisores, com tratamento químico.

Fonte: Adaptado de Zhao e Poon (2017).

Pode-se observar na tabela 10, que a granulometria do resíduo de vidro e da areia utilizada foi inferior a 5 mm. Nota-se ainda que a massa específica do resíduo de vidro é cerca de 20% superior a da areia. Em relação à concentração de chumbo nos resíduos, nota-se que o tratamento químico foi eficaz na sua remoção.

O cimento utilizado no estudo de Zhao e Poon (2017) foi o CP I. O traço da argamassa foi 1:2,5, em massa, com relação água/cimento de 0,45. Os teores de substituição de areia por resíduo foram de 25, 50 e 75%. Foram avaliadas a trabalhabilidade, as resistências à compressão e à flexão das argamassas e o módulo de elasticidade, aos 28 e 90 dias de cura e RAS. Com o objetivo de controlar os efeitos da RAS, os autores substituíram 25% do cimento por cinza volante, em todas as misturas.

Zhao e Poon (2017) constataram que houve uma melhora da trabalhabilidade das argamassas com o aumento do teor de resíduo. Os autores notaram que o melhor desempenho foi apresentado pelo resíduo sem tratamento químico. Os autores atribuíram esta melhora ao maior módulo de finura apresentado pelos resíduos comparado ao agregado natural, o que implica numa menor área de superfície total por unidade de volume do agregado na mistura.

Ao avaliar o comportamento das argamassas quanto as resistências à compressão e à flexão e módulo de elasticidade, os autores notaram que as argamassas com incorporação do resíduo, principalmente o resíduo sem tratamento químico, apresentaram uma melhora das propriedades mecânicas, comparado à argamassa de referência. Os autores atribuem o melhor desempenho das argamassas com resíduo sem tratamento ao maior teor de chumbo presente, resultando, na formação de hidróxido de chumbo $Pb(OH)_2$, o que, segundo os autores, favorece à formação de C-S-H.

Quanto à RAS, Zhao e Poon (2017) comentam que nenhuma das barras de argamassa excedeu a taxa de expansão estabelecida pela ASTM C 1260. Segundo os autores, a adição de cinza volante nas argamassas contribuiu com a mitigação da RAS.

No quadro 1 é apresentado um resumo dos estudos em que se utilizou resíduo de vidro em substituição a areia, na produção de argamassas.

Quadro 1 Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição a areia, na produção de argamassas

Autores	Características	Comportamento das argamassas com resíduo em relação à argamassa de referência
Park e Lee (2004)	Resíduo de vidro: garrafas (marrom e verde) Granulometria: < 4,8 mm Teor sub. da areia (%): 10, 20, 30, 50 e 100 (massa) Cimento: CP I Traço: 1:2,25 (massa) Rel. a/c: 0,47	menor resistência à compressão; menor resistência à flexão; ocorreu RAS, exceto para o teor 10% de vidro marrom
Corinaldesi <i>et al.</i> (2005)	Resíduo de vidro: construção e demolição Granulometria (3): < 36 µm; 36-50 µm; 50-100 µm Teor sub. da areia (%): 30 e 70 (massa) Cimento: CP II (42,5R) Traço: 1:3 (massa) Rel. a/c: 0,56	menor trabalhabilidade; maior resistência à compressão; maior resistência à flexão
Ling e Poon (2012)	Resíduo de vidro: tubo de raio catódico; garrafas Módulo de finura: 3,14 a 3,61 Teor sub. da areia (%): 50 e 100 (volume) Cimento: CP I Traço: 1:2,5 (massa) Rel. a/c: 0,45	maior trabalhabilidade; menor resistência à compressão; menor resistência à flexão; menor permeabilidade; não ocorreu RAS
Penacho (2012)	Resíduo de vidro: plano recozido Granulometria: < 2,4 mm Teor sub. da areia (%): 20, 50 e 100 (volume) Cimento: CEM II/B-L 32,5N Traço: 1:4 (volume) Rel. a/c: 0,39	menor trabalhabilidade; maior resistência à compressão das argamassas com teor até 50%; menor permeabilidade; ocorreu RAS para as argamassas com teor de 100%

Autores	Características	Comportamento das argamassas com resíduo em relação à argamassa de referência
Oliveira (2012)	Resíduo de vidro: plano recozido Granulometria: < 0,15 mm Teor de adição em relação à areia (%): 10, 15 e 20 (massa) Cimento: CEM II/B-L 32,5N Traço: 1:4 (massa) Rel. a/c: 1,14	maior trabalhabilidade; maior módulo de elasticidade dinâmico; maior resistência à compressão; maior resistência à flexão; menor permeabilidade
Du e Tan (2013a; 2013b)	Resíduo de vidro: garrafas (marrom, verde e transparente) Granulometria: < 4,8 mm Teor sub. da areia (%): 25, 50 e 100 (massa) Cimento: CP I Traço: 1:2,25 (massa) Rel. a/c: 0,47	menor trabalhabilidade; menor resistência à compressão, exceto para o teor 25% de vidro verde; menor resistência à flexão para os teores de 50 e 100%; ocorreu RAS para as argamassas com vidro transparente
Zhao e Poon (2017)	Resíduo de vidro: tubo de raio catódico Granulometria: < 5 mm Teor sub. da areia (%): 25, 50 e 75 (massa) Cimento: CP I Traço: 1:2,5 (massa) Rel. a/c: 0,45	maior trabalhabilidade; maior resistência à compressão; maior resistência à flexão; não ocorreu RAS

2.5.1.2 Em substituição ao cimento

Wang (2011) desenvolveu um estudo que avaliou o efeito da substituição do cimento por resíduo de vidro óptico (LCD), na produção de argamassa. O resíduo de vidro óptico (LCD) foi proveniente do transistor de cristal líquido de televisores. Segundo o autor, a massa específica do resíduo foi 2,65 g/cm³. Após o beneficiamento (trituração e moagem), o resíduo adquiriu uma superfície específica igual a 3850 cm²/g. A composição química do vidro LCD é apresentada na tabela 11.

Tabela 11 Composição química do resíduo de vidro LCD

Composição (%)	Resíduo de vidro LCD
SiO ₂	62,5
Na ₂ O	0,6
Al ₂ O ₃	16,8
Fe ₂ O ₃	9,4
CaO	2,7
MgO	0,2
K ₂ O	1,4

Fonte: Wang (2011).

Observa-se na tabela 11 que a predominância é de SiO_2 . As concentrações de Al_2O_3 e Fe_2O_3 são bastante significativas neste tipo de vidro.

No estudo, Wang (2011) utilizou cimento CP I. O traço da argamassa foi de 1:2,75, em massa, com uma relação água/cimento igual a 0,485. Os teores de substituição adotados foram de 10, 20, 30, 40 e 50%, em massa. Foram avaliadas a trabalhabilidade, as resistências à compressão e à flexão das argamassas, aos 7 e 28 dias de cura. Também foram avaliados aspectos de durabilidade, através da imersão das argamassas em sulfato de sódio, ácido sulfúrico concentrado e hidróxido de sódio.

Ao avaliar a trabalhabilidade e o tempo de pega das argamassas com resíduo de vidro LCD, Wang (2011) verificou que a incorporação do resíduo provocou uma redução da consistência e do tempo de pega, para todos os teores avaliados. O autor atribuiu a redução de consistência à baixa absorção de água pela partícula de vidro, devido à impermeabilidade da sua superfície. Não foi feita referência à superfície lisa das partículas de vidro.

Wang (2011) verificou que a resistência da argamassa com 10% de resíduo de vidro LCD foi semelhante à da argamassa de referência. A partir desse teor, a resistência à compressão e à flexão, aos 28 dias, das argamassas com resíduo de vidro foi menor, quanto maior o teor de resíduo. O autor atribuiu esse comportamento à redução na formação de produtos hidratados com a substituição do cimento pelo resíduo de vidro LCD.

No que se refere aos resultados do ensaio de ataque dos corpos de prova de argamassa por sulfato de sódio, ácido sulfúrico concentrado e hidróxido de sódio, de acordo com Wang (2011), a argamassa com 10% de resíduo de vidro apresentou uma perda de massa semelhante à referência. As argamassas com teores de resíduo superiores a 10% apresentaram maior perda de massa, em relação à argamassa de referência. Este comportamento foi justificado pelo autor, como sendo devido à redução da formação de produtos hidratados nas argamassas com resíduo de vidro.

Matos e Coutinho (2012) avaliaram o comportamento de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro de para-brisa. A composição química e as propriedades físicas do resíduo são apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de para-brisa

Propriedades	Resíduo de vidro de para-brisa	
Composição química	SiO ₂ (%)	70
	Al ₂ O ₃ (%)	1,2
	Fe ₂ O ₃ (%)	0,65
	CaO(%)	8,7
	MgO(%)	3,7
	Na ₂ O(%)	16
	K ₂ O(%)	0,35
	SO ₃ (%)	< 0,05
	Cl(%)	< 0,005
Propriedades físicas	Massa específica (g/cm ³)	2,68
	Expansibilidade (mm)	≈0

Fonte: Matos e Coutinho (2012).

O cimento utilizado no estudo de Matos e Coutinho (2012) foi o CEM I 42.5R. As granulometrias do resíduo e do cimento estão apresentadas na figura 10.

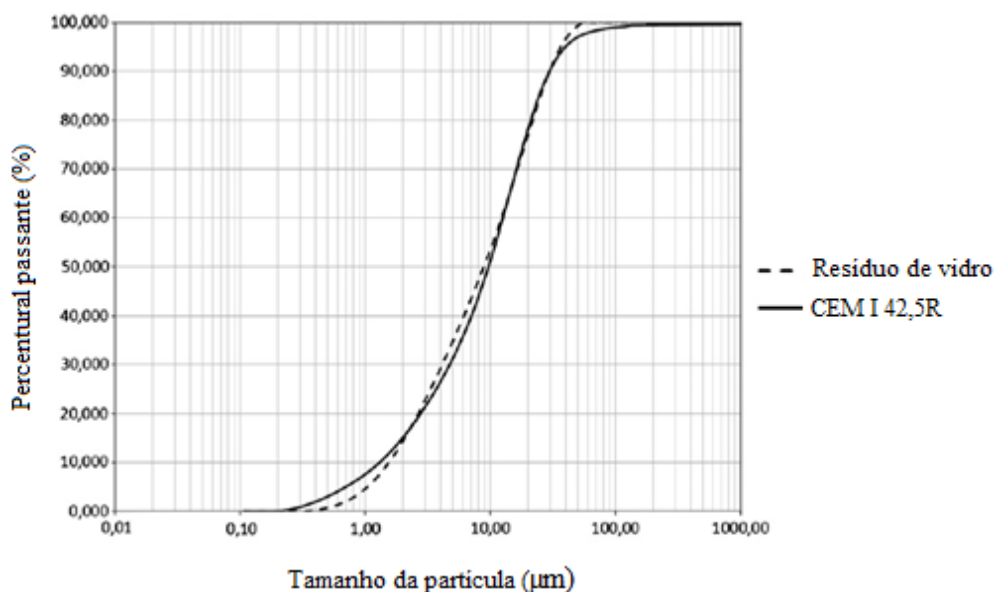


Figura 10 Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de vidro e do cimento (MATOS; COUTINHO, 2012)

Verifica-se na figura 10 que o cimento e o resíduo de vidro apresentaram distribuições granulométricas semelhantes.

O traço das argamassas utilizado no estudo de Matos e Coutinho (2012) foi 1:3, em massa, com relação água/cimento de 0,5. Os teores de substituição do cimento por resíduo foram de 10 e 20%, em massa. As argamassas foram avaliadas quanto à consistência, resistência à compressão e à flexão, aos 7, 28, 90, 180 e 562 dias de cura.

De acordo com Matos e Coutinho (2012), a trabalhabilidade aumentou com a incorporação do resíduo de vidro. Este comportamento não foi justificado. Em relação aos ensaios de resistência à compressão e à flexão, nas idades de 7 e 28 dias, as resistências das argamassas com resíduo foram menores do que as da argamassa de referência. Por outro lado, nas idades 90, 180 e 562 dias, não houve diferença significativa entre os resultados de resistências das argamassas com resíduo e de referência. Os autores justificaram o maior ganho de resistência das argamassas com resíduo de vidro, em idades mais tardias, devido à atividade pozolânica do resíduo.

Matos e Coutinho (2012) também avaliaram características relacionadas à durabilidade, através dos ensaios de ataque por cloreto, ataque de sulfato, absorção por capilaridade, carbonatação, e expansão por RAS. Os autores afirmaram que a incorporação do resíduo de vidro contribuiu com a redução da permeabilidade das argamassas, tornando-as menos susceptíveis a ataques externos. Os autores atribuíram o resultado ao refinamento dos poros, proveniente da atividade pozolânica do resíduo de vidro. Segundo os autores, o uso do resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento aumentou a resistência a penetração de cloretos, apresentou expansão por sulfato inferior ao limite estabelecido pela norma portuguesa E-462 e a taxa de absorção por capilaridade foi semelhante a da argamassa de referência. Quanto à carbonatação, verificaram um aumento da frente de carbonatação com o aumento do teor de resíduo incorporado. Segundo os autores, há uma tendência do aumento da carbonatação em misturas cimentícias com materiais pozolânicos, provavelmente devido a redução do CH.

Quanto ao ensaio de RAS, Matos e Coutinho (2012) observaram que a expansão das argamassas com resíduo de vidro não excedeu o limite estabelecido pela ASTM C 1260. Foi observado ainda que a argamassa com resíduo de vidro apresentou menor expansão comparado com a argamassa de referência. Os autores justificaram este comportamento, devido a maior densificação da matriz a partir atividade pozolânica apresentada pelo resíduo.

Oliveira, Gomes e Santos (2012) avaliaram a atividade pozolânica do resíduo de vidro de garrafas, utilizado em substituição parcial ao cimento, em argamassa. A composição química e as propriedades físicas do resíduo de vidro são apresentadas na tabela 13.

Tabela 13 Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de garrafas

Propriedades		Tipo de resíduo		
		Vidro verde	Vidro marrom	Vidro transparente
Composição química	SiO ₂ (%)	72,25	73,27	74,07
	Al ₂ O ₃ (%)	2,54	3,09	2,57
	Na ₂ O(%)	10,54	10,37	9,94
	CaO(%)	12,35	11,36	11,53
	K ₂ O(%)	1,15	1,10	1,14
	MgO(%)	1,18	0,81	0,75
Propriedades físicas	Massa específica (g/cm ³)	2,52	2,51	2,53
	Absorção de água (%)	0,41	0,40	0,41

Fonte: Oliveira, Gomes e Santos (2012).

Verifica-se na tabela 13 que os três tipos de vidro (marrom, verde e transparente) possuem teores próximos de sílica reativa (SiO₂). Percebe-se que a somatória dos teores de SiO₂ e Al₂O₃ atende aos requisitos químicos da NBR 12653 (2014), que classificam o material como uma pozolana. Por outro lado, apresentam um elevado teor de álcalis, principalmente Na₂O, e que pode contribuir para reação álcali-sílica na matriz cimentícia.

A fim de avaliar a pozolanicidade, os autores adotaram três frações granulométricas para o resíduo: abaixo de 45 µm, de 45 a 75 µm e entre 75 a 150 µm.

Segundo Oliveira, Gomes e Santos (2012), o cimento utilizado foi o CEM I 42.5R e o traço da argamassa foi 1:3, em massa, com relação água/cimento de 0,5. As características avaliadas das argamassas foram: consistência, resistência à compressão, aos 7, 28 e 90 dias de cura, e RAS.

De acordo com Oliveira, Gomes e Santos (2012), a substituição de cimento por resíduo de vidro, em seus diferentes teores e granulometrias, não resultou em uma mudança significativa da trabalhabilidade. Os autores comentam que o baixo índice de consistência adotado para a argamassa de referência (espalhamento de 110 mm), pode ter influenciado para que este resultado não se alterasse com a incorporação do resíduo de vidro.

No que se refere aos resultados de resistência à compressão, Oliveira, Gomes e Santos (2012) verificaram que a resistência das argamassas com incorporação do resíduo de vidro na fração de 75 a 150 µm, diminuiu. Por outro lado, para as argamassas com teores de até 25% de resíduo, nas frações inferiores a 45 µm ou entre 45 e 75 µm, a resistência foi semelhante a da argamassa de referência, tanto aos 28 quanto aos 90 dias. Os autores atribuíram o resultado à atividade pozolânica do resíduo de vidro com tamanho de partícula inferior a 75 µm.

Oliveira, Gomes e Santos (2012) também avaliaram possíveis efeitos da RAS apenas na argamassa com a fração do resíduo de 45 a 75 μm , uma vez que, a argamassa com esta fração apresentou melhor comportamento quanto à resistência à compressão. Os autores argumentaram ainda que o uso de partículas maiores acarretaria a RAS. Com base nos resultados, os pesquisadores constataram que até 30% do cimento pôde ser substituído por resíduo de vidro, na fração de 45 a 75 μm , sem exceder a taxa e expansão estabelecida pela ASTM C 1260. Os autores atribuem o resultado à densificação da matriz devido à atividade pozolânica do resíduo de vidro. No entanto, há que se considerar, que a sílica amorfa reage mais rapidamente com o hidróxido do que com os álcalis do cimento.

Sauer (2013) desenvolveu um trabalho no qual foi verificado o potencial de utilização do resíduo de vidro laminado de para-brisa, substituindo parcialmente o cimento, na produção de argamassas de recuperação estrutural. A composição química e as propriedades físicas do resíduo são apresentadas na tabela 14.

Tabela 14 Composição química e propriedades físicas do resíduo de vidro de para-brisa

Propriedades	Resíduo de vidro de para-brisa	
Composição química	SiO ₂ (%)	56,77
	Al ₂ O ₃ (%)	6,07
	Fe ₂ O ₃ (%)	0,29
	CaO(%)	5,64
	MgO(%)	3,67
	Na ₂ O(%)	15,41
	K ₂ O(%)	0,16
	Perda ao fogo(%)	11,81
Propriedades físicas	Massa específica (g/cm ³)	2,31
	Superfície específica - Blaine (cm ² /g)	7833

Fonte: Sauer (2013).

Verifica-se que o teor de SiO₂, embora preponderante, é menor do que em outros tipos de vidro já apresentados. Por outro lado, o teor de Na₂O é muito elevado, o que pode ocasionar a RAS.

No estudo, Sauer (2013) utilizou o cimento do tipo CP V ARI. As curvas granulométricas do resíduo e do cimento estão apresentadas na figura 11.

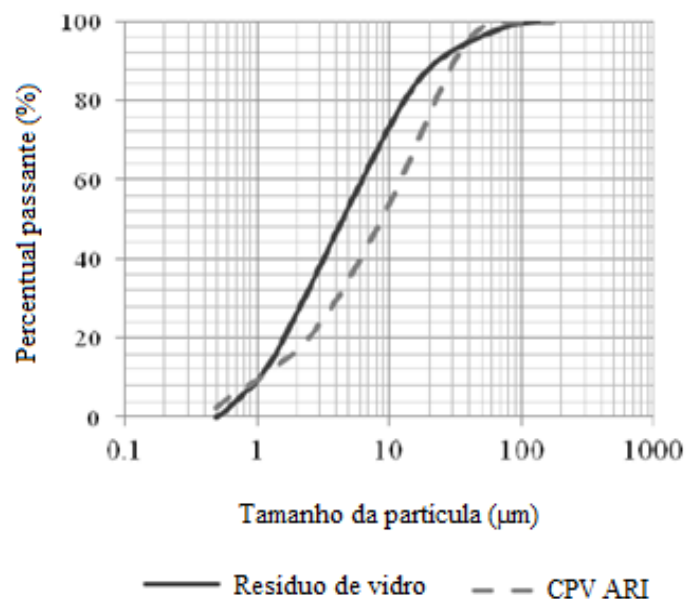


Figura 11 Curvas de distribuição granulométrica do resíduo de vidro e do cimento (Fonte: SAUER, 2013)

Com base na figura 11, o diâmetro médio do resíduo de vidro foi de 5 µm, e o do cimento de 8 µm.

Sauer (2013) adotou o traço da argamassa de 1:3, em massa, e a relação água/cimento igual a 0,40. Os teores de substituição do cimento por resíduo utilizados foram de 7, 13, 20 e 26%, em massa. As argamassas foram avaliadas quanto à consistência, massa específica, resistência à compressão (7, 28, 63 e 270 dias de idade), módulo de elasticidade dinâmico (7, 28, 63 e 270 dias de idade), retração linear (1, 7, 28 e 63 dias de idade), resistência de aderência à tração (7 dias após a aplicação da argamassa, apenas nas misturas com teores de substituição 13 e 26%) e absorção de água por capilaridade (aos 28 dias de idade).

Com base nos resultados, Sauer (2013) chegou às seguintes conclusões:

- houve uma redução da trabalhabilidade e da massa específica das argamassas, com o aumento do teor de resíduo de vidro laminado utilizado. O autor atribuiu a redução do índice de consistência, à geometria das partículas de vidro e a sua elevada superfície específica. A queda no valor da massa específica foi justificada pelo fato do resíduo de vidro apresentar massa específica bem menor que a do cimento utilizado;
- a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas com resíduo de vidro laminado, em geral, foram inferiores à argamassa referência. O autor justifica essa redução da resistência devido à diminuição na força de adesão entre a pasta

de cimento e o agregado por conta da presença no resíduo de polivinilbutiral, polímero utilizado na fabricação de vidros laminados;

- houve uma tendência de aumento da retração linear das argamassas com incorporação do resíduo de vidro laminado. O autor aponta a presença do polivinilbutiral como fator que mais influenciou para o aumento desta retração;

- a resistência de aderência à tração das argamassas com substituição do cimento por resíduo de vidro laminado aumentou. O autor atribuiu o ocorrido a um possível melhoramento da estrutura das argamassas com resíduo, não identificando qual e de que forma ocorreu esta melhoria;

- a absorção de água por capilaridade das argamassas com resíduo de vidro foi menor do que a absorção da argamassa de referência. O autor não justificou este comportamento.

Analisando o comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão e resistência de aderência, nota-se que os resultados não estão coerentes. A superfície das partículas de vidro é bastante lisa, logo espera-se uma redução na resistência de aderência, o que não ocorreu.

Parghi e Alan (2016) avaliaram o comportamento de argamassas com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro de garrafas (marrom, verde e transparente). A composição química do resíduo é apresentada na tabela 15.

Tabela 15 Composição química do resíduo de vidro de garrafas

Composição (%)	Resíduo de vidro de garrafas
SiO ₂	71,00
Al ₂ O ₃	8,00
Fe ₂ O ₃	0,90
CaO	8,50
MgO	0,38
Na ₂ O	9,80
K ₂ O	0,37

Fonte: Parghi e Alan (2016).

Pode-se observar que o resíduo de vidro de garrafas possui um teor de óxido de sílica (SiO₂) e de Na₂O dentro da faixa dos demais estudos.

A granulometria do resíduo de vidro está apresentada na figura 12.

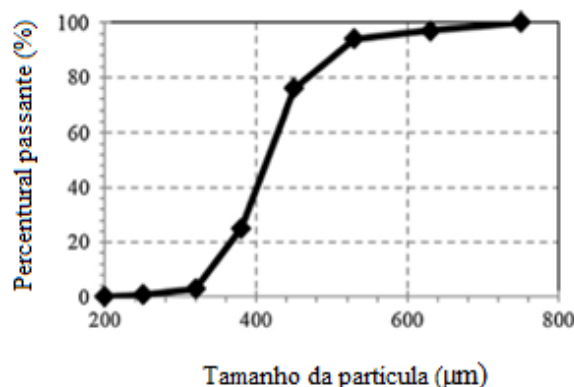


Figura 12 Curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro (PARGHI; ALAN, 2016)

De acordo com os autores, o percentual passante para os tamanhos de partículas inferiores a 75 µm e 45 µm foram 97% e 76%, respectivamente. Logo, o resíduo de vidro é composto por partículas finas.

Segundo Parghi e Alan (2016), o cimento utilizado foi o CP I. O traço adotado para as misturas foi de 1:2,75, em massa, com relação água/cimento de 0,40. Os teores de substituição foram de 5, 10, 15, 20 e 25%, em massa.

As argamassas foram avaliadas quanto à consistência, resistência à compressão (aos 7, 28, 56 e 90 dias de idade), densidade aparente, absorção de água e expansão pela RAS.

De acordo com Parghi e Alan (2016) houve uma redução na trabalhabilidade das argamassas, com a incorporação do resíduo de vidro. Foi utilizado um teor de 1,25% de aditivo superplastificante, para tornar as argamassas com resíduo trabalháveis. Os autores atribuíram a diminuição da consistência das argamassas com resíduo à finura das partículas de vidro, portanto, devido a sua elevada superfície específica. No entanto, pela granulometria do resíduo apresentada, não é possível constatar que seja mais fino do que o cimento.

Parghi e Alan (2016) chegaram às seguintes conclusões:

- a resistência à compressão das argamassas aumentou consideravelmente quando se utilizou o resíduo de vidro. O melhor resultado foi apresentado pela argamassa com teor de substituição de 25%, aos 90 dias, cujo aumento na resistência foi de 40%, em relação à argamassa de referência. O aumento da resistência das argamassas com resíduo de vidro foi atribuído pelos autores a maior dissolução da sílica e do alumínio. Essa dissolução resultou em um bom índice de atividade pozzolânica do resíduo. Além disso, os autores

destacam a ação filler, que contribuiu preenchendo os vazios entre a matriz de cimento e a superfície do agregado;

- a densidade aparente das argamassas aumentou com o aumento do teor de substituição de cimento por resíduo de vidro;

- a utilização de resíduo de vidro proporcionou uma redução na absorção de água das argamassas. Segundo os autores, isto ocorre devido ao efeito filler proporcionado pelo resíduo e a sua reação pozolânica, que forma C-S-H gel, resultando em uma maior densificação da matriz;

-as argamassas com resíduo de vidro não excederam o limite de expansão previsto pela ASTM C 1260. Segundo os autores, as argamassas com até 20% de resíduo de vidro apresentaram menor expansão, quando comparadas à argamassa de referência.

Parghi e Alan (2016) incorporaram sílica ativa e cinza volante nas argamassas com 25% do resíduo de vidro, com o intuito de conter a expansão ocasionada pela RAS. Segundo os autores, a incorporação das adições minerais contribuiu para o controle da RAS.

No quadro 2 é apresentado um resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento na produção de argamassas, com os respectivos resultados.

Quadro 2 Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento, na produção de argamassas

Autores	Características	Comportamento das argamassas com resíduo em relação à argamassa de referência
Wang (2011)	Resíduo de vidro: vidro LCD Superfície específica (cm ² /g): 3850 Teor sub. do cimento (%): 10, 20, 30, 40 e 50 (massa) Cimento: CP I Traço: 1:2,75 (massa) Rel. a/c: 0,47	menor trabalhabilidade; menor tempo de pega; menor resistência à compressão; menor resistência à flexão; maior permeabilidade
Oliveira, Gomes e Santos (2012)	Resíduo de vidro: garrafas Granulometria (3): < 45 µm; 45 a 75 µm e 75 a 150 µm Teor sub. do cimento (%): 10, 20, 25, 30 e 40 (massa) Cimento: CEM I 42.5R Traço: 1:3 (massa) Rel. a/c: 0,50	mesma trabalhabilidade; maior resistência à compressão para teores até 25% de resíduo com granulometria < 45 µm e entre 45 a 75 µm; não ocorreu RAS para a fração entre 45 a 75 µm

Autores	Características	Comportamento das argamassas com resíduo em relação à argamassa de referência
Matos e Coutinho (2012)	Resíduo de vidro: para-brisa Granulometria: diâmetro médio de 38 µm Teor sub. do cimento (%): 10 e 20 (massa) Cimento: CEM I 42.5R Traço: 1:3 (massa) Rel. a/c: 0,50	maior trabalhabilidade; maior resistência à compressão; maior resistência à flexão; menor permeabilidade em idades avançadas; não ocorreu RAS
Sauer (2013)	Resíduo de vidro: para-brisa Granulometria: diâmetro médio de 5 µm Teor sub. do cimento (%): 7, 13, 20 e 26 (massa) Cimento: CP V ARI Traço: 1:3 (massa) Rel. a/c: 0,40	menor trabalhabilidade; menor resistência à compressão; maior retração; maior aderência; menor permeabilidade
Parghi e Alan (2016)	Resíduo de vidro: garrafas (verde, marrom e transparente) Granulometria: < 75 µm Teor sub. do cimento (%): 5, 10, 15, 20 e 25 (massa) Cimento: CPI Traço: 1:2,75 (massa) Rel. a/c: 0,40	menor trabalhabilidade; maior resistência à compressão; menor permeabilidade; não ocorreu RAS

2.5.2 Utilização de resíduo de vidro em concretos

2.5.2.1 Em substituição à areia

Ismail e Al-Hashmi (2009) verificaram a influência da substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro de tubo catódico (televisão e monitores) nas propriedades do concreto. A composição química e as propriedades físicas do resíduo de vidro utilizado estão apresentadas na tabela 16.

Propriedades	Resíduo de vidro de tubo catódico	
	SiO ₂ (%)	67,72
	Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	3,40
Composição química	CaO(%)	6,90
	SO ₃ (%)	0,17
	Na ₂ O+K ₂ O(%)	10,75
	MgO(%)	6,00
	Massa específica (g/cm ³)	2,19
Propriedades físicas	Absorção de água (%)	0,39
	Módulo de finura	2,36

Fonte: Ismail e Al-Hashmi (2009).

Observa-se, como nos demais estudos, a grande predominância do SiO₂ e o elevado teor de álcalis no resíduo.

A composição granulométrica da areia e do resíduo de vidro utilizados neste estudo estão apresentadas na tabela 17.

Tabela 17 Granulometria dos agregados miúdos utilizados

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)	
	Areia	Resíduo de vidro
4,75	0,5	0
2,36	10,84	0,02
1,18	19,3	31,65
0,60	31,6	53,86
0,30	75,03	70,37
0,15	96,19	79,97

Fonte: Adaptado de Ismail e Al-Hashmi (2009).

Verificou-se que o resíduo apresentou teor de finos bem maior do que a areia.

O cimento utilizado no estudo de Ismail e Al-Hashmi (2009) foi o CP I. O traço do concreto foi de 1:1,88:2,68 (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo), em volume, com relação água/cimento de 0,53. Os teores de substituição da areia por resíduo de vidro foram de 10, 15 e 20%. As propriedades do concreto avaliadas foram: trabalhabilidade, resistência à compressão (aos 3, 7, 14 e 28 dias) e RAS.

Segundo Ismail e Al-Hashmi (2009), o abatimento diminuiu quanto maior foi o teor de resíduo no concreto. Os autores justificaram a perda de trabalhabilidade devido à elevada angulosidade das partículas de vidro. Com relação à resistência à compressão, os autores verificaram que houve aumento da resistência com a incorporação do resíduo de vidro. O melhor resultado de resistência à compressão, aos 28 dias, foi obtido pelo concreto com teor de 20% de resíduo. O aumento na resistência foi de 4,23%, quando comparado com o concreto de referência. Os autores atribuíram este aumento na resistência à possível atividade pozolânica das partículas do resíduo de vidro.

No que se refere aos efeitos deletérios ocasionados pela RAS, Ismail e Al-Hashmi (2009) comentaram que as argamassas com resíduo de vidro não excederam o limite de expansão estabelecido conforme a ASTM C 1260. Os autores justificaram que o resíduo de vidro fino consumiu Ca(OH)₂ e, conseqüentemente, reduziu a alcalinidade, diminuindo assim o fluxo dos íons alcalinos pela estrutura cimentícia.

Taha e Nounu (2010) desenvolveram um estudo experimental que avaliou o potencial de utilização do resíduo de vidro de garrafas de cores mistas substituindo a

areia, na produção de concreto. O cimento utilizado foi o CEM1 42,5N. O traço do concreto foi 1:1,73:1,57:0,89 (cimento: areia: agregado graúdo 20 mm: agregado graúdo 10 mm), e relação água/cimento de 0,38. Os teores de substituição adotados foram de 50 e 100% para a areia, em massa. A granulometria do resíduo de vidro foi inferior a 5 mm. As propriedades do concreto avaliadas foram: trabalhabilidade, densidade de massa no estado fresco, resistência à compressão (aos 28 e 364 dias), absorção de água, e RAS, até 52 semanas de idade do concreto.

Os resultados das propriedades do concreto no estado fresco são apresentados na tabela 18.

Tabela 18 Propriedades do concreto no estado fresco

Mistura	Teor de resíduo (%)	Slump (mm)	Densidade aparente (kg/m ³)	Inspeção visual
C-0	0	120	2440	Consistente e homogênea
C-50	50	95	2430	Homogênea mas pouco consistente
C-100	100	80	2390	Exsudação e segregação

Fonte: Adaptado de Taha e Nouno (2010).

Pode-se observar que as misturas com resíduo apresentaram redução na trabalhabilidade e na densidade aparente. Os autores justificam a redução no slump das misturas de concreto com resíduo, devido à presença de um maior teor finos no resíduo de vidro, comparado à areia. Em relação à redução da densidade do concreto com a incorporação do resíduo de vidro, atribuem este fato a menor massa específica apresentada pelo resíduo de vidro, comparado à areia.

Com relação aos resultados de resistência à compressão, avaliada aos 28 e 364 dias, Taha e Nouno (2010) observaram que a incorporação do resíduo de vidro como agregado miúdo não influenciou significativamente na resistência à compressão dos concretos.

Quanto à absorção de água, Taha e Nouno (2010) observaram que os concretos com teor de 50 e 100% de resíduo de vidro apresentaram melhor comportamento. Segundo os autores, o baixo valor de absorção de água do resíduo de vidro comparado à areia, contribuiu com a redução da taxa de absorção de água do concreto.

No que se refere aos resultados do ensaio de reação álcali-sílica (RAS), os autores notaram que as barras de argamassa com resíduo de vidro de garrafas apresentaram expansão em um nível superior ao estipulado pela ASTM C 1260. Os autores afirmam

ainda que as argamassas com resíduo de vidro apresentaram expansões superiores à argamassa de referência na idade de 364 dias. Foi atribuído o efeito da RAS à presença de maior teor de sílica reativa nas partículas do resíduo e à faixa granulométrica utilizada.

No quadro 3 é apresentado um resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição à areia, na produção de concretos, com os respectivos resultados.

Quadro 3 Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição à areia, na produção de concretos

Autores	Características	Comportamento dos concretos com resíduo em relação ao concreto de referência
Ismail e Al-Hashmi (2009)	Resíduo de vidro: tubo de raio catódico Granulometria: < 4,8 mm Teor sub. da areia (%): 10, 15 e 20 (massa) Cimento: CPI Traço: 1:1,88:2,68 (massa) Rel. a/c: 0,53	menor trabalhabilidade; maior resistência à compressão; não ocorreu RAS
Taha e Nounu (2010)	Resíduos de vidro: garrafas Granulometria: < 5 mm Teor sub. da areia (%): 50 e 100 (massa) Cimento: CEM1 - 42,5N Traço: 1:1,73:1,57:0,89 (massa) Rel. a/c: 0,38	menor trabalhabilidade; resistência à compressão semelhante ao REF; menor permeabilidade; ocorreu RAS

2.5.2.2 Em substituição ao cimento

Nos seus estudos, Shao *et al.* (2000) avaliaram a possibilidade de utilização de resíduo de vidro de lâmpadas fluorescentes, finamente moído, como substituição parcial do cimento, em misturas de concreto. Neste estudo foram testadas três diferentes granulometrias para o resíduo: < 150 μm , < 75 μm e < 38 μm . A massa específica do resíduo de vidro e do cimento foram 2,40 g/cm³ e 3,15 g/cm³, respectivamente. A composição química do resíduo está apresentada na tabela 19.

Tabela 19 Composição química do resíduo de vidro de lâmpadas fluorescentes

Composição (%)	Resíduo de vidro de lâmpadas fluorescentes
SiO ₂	72,8
Al ₂ O ₃	1,4
CaO	4,9
MgO	3,4
Na ₂ O	16,3
K ₂ O	0,3

Fonte: Shao *et al.* (2000).

Observa-se a grande predominância de sílica (SiO_2) e a elevada presença de Na_2O também no resíduo de vidro de lâmpada fluorescente.

De acordo com Shao *et al.* (2000), o cimento utilizado foi o CP I. O traço do concreto, em massa, foi de 1:2,27:4,23 (aglomerante, areia e brita), com uma relação água/cimento de 0,75. Foi utilizado 30% de resíduo de vidro em substituição ao cimento, em massa. Foram avaliadas a resistência à compressão, aos 28 e 90 dias, e a expansão por RAS.

Ao analisar a pozolanicidade do resíduo, através do ensaio de resistência à compressão, Shao *et al.* (2000) verificaram que apenas o resíduo com a fração granulométrica $< 38 \mu\text{m}$ apresentou atividade pozolânica. Os índices de atividade pozolânica foram de 96% e 108%, aos 28 e 90 dias, respectivamente.

Com relação aos resultados de verificação da expansão por RAS, Shao *et al.* (2000) verificaram que as argamassas com resíduo de vidro (granulometria $< 38 \mu\text{m}$) não excederam o limite de expansão previsto pela ASTM C 1260. Os autores atribuíram este comportamento ao melhoramento da microestrutura da argamassa com resíduo, associado à atividade pozolânica do resíduo de vidro. Deste modo, os autores comentaram que o tamanho da partícula de vidro é o fator de maior influência sobre sua dissolução e, conseqüentemente, atividade pozolânica, em matrizes cimentícias.

Antônio (2012) avaliou a influência da utilização de resíduo de vidros planos substituindo o cimento na produção de concreto. A composição química do resíduo é apresentada na tabela 20.

Tabela 20 Composição química do resíduo de vidros planos

Composição (%)	Resíduo de vidros planos
SiO_2	64,29
Al_2O_3	4,25
Fe_2O_3	0,38
CaO	13,64
MgO	4,16
Na_2O	11,49
K_2O	0,53
Perda ao fogo	0,80

Fonte: Antônio (2012).

Também nos vidros planos nota-se a grande predominância do SiO_2 e a alta concentração de Na_2O .

A distribuição granulométrica do resíduo é apresentada na tabela 21.

Tabela 21 Distribuição granulométrica do resíduo de vidro

Material passante (%)	Granulometria (μm)
10	2,08
50	9,90
90	38,37

Fonte: Antônio (2012).

No estudo de Antônio (2012), o cimento utilizado foi o CPV ARI. O traço adotado foi 1:2,05:2,79 (aglomerante, areia, brita), em massa, com relação água/cimento de 0,51. Os teores de substituição do cimento por resíduo foram de 5, 10, 15 e 20%, em massa. Foi determinada a resistência à compressão dos concretos aos 3, 7 e 28 dias de idade. De acordo com o autor, para todos os teores avaliados a resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro diminuiu comparado ao concreto de referência. O autor não justificou este comportamento. No entanto, deve estar relacionado à diminuição da formação de produtos hidratados com a incorporação do resíduo no concreto.

Antônio (2012) também analisou a microestrutura das misturas, através de microscopia eletrônica de varredura. A figura 13 ilustra imagens da microestrutura.

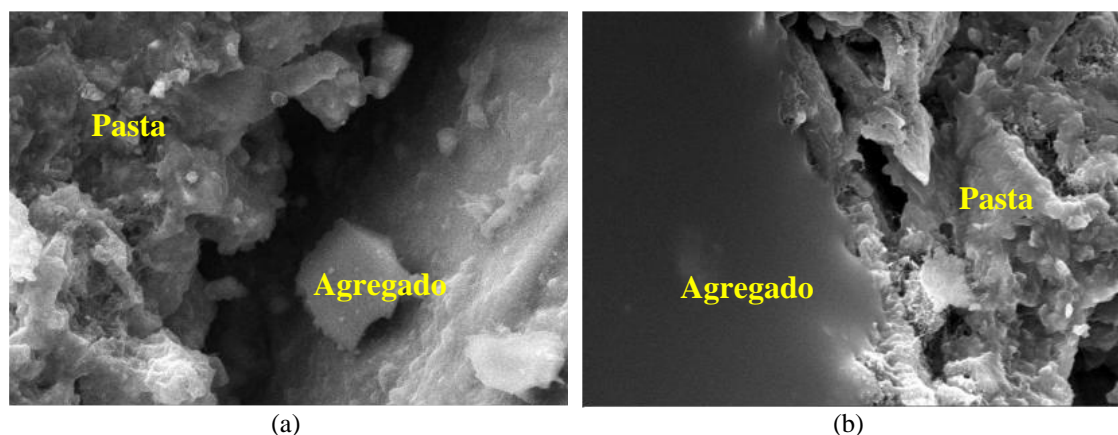


Figura 13 Micrografias dos concretos: (a) referência e (b) com 20% de resíduo (ampliação de 5000 vezes) (Fonte: ANTÔNIO, 2012)

De acordo com Antônio (2012), os concretos não apresentaram qualquer tipo de fissuração que apontasse para a possível formação de um gel, gerado pela RAS, cujas características são expansivas. Observou ainda, que com a incorporação de 20% de resíduo de vidro ocorreu um maior preenchimento da zona de transição (entre a pasta de cimento e o agregado do concreto).

Simões (2013) avaliou a substituição parcial do cimento por resíduo de vidro laminado de para-brisa. A massa específica do resíduo de vidro foi $2,31 \text{ g/cm}^3$ e a do cimento $2,93 \text{ g/cm}^3$. A superfície específica do resíduo foi $9051 \text{ cm}^2/\text{g}$, enquanto que a

cimento foi 4782 cm²/g. A composição química do resíduo de vidro utilizado está apresentada na tabela 22.

Tabela 22 Composição química do resíduo de vidro de para-brisa

Composição (%)	Resíduo de vidro de para-brisa
SiO ₂	56,77
Al ₂ O ₃	6,07
Fe ₂ O ₃	0,29
CaO	5,64
MgO	3,67
Na ₂ O	15,41
K ₂ O	0,16
SO ₃	0,16
Perda ao fogo	11,81

Fonte: Simões (2013).

A distribuição granulométrica do resíduo é apresentada na figura 14.

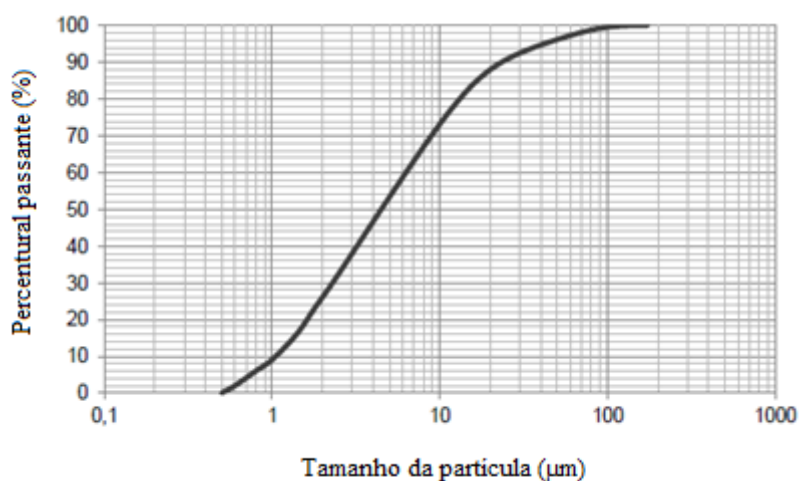


Figura 14 Curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro (SIMÕES, 2013)

Verifica-se na figura 14 que o diâmetro médio do resíduo foi de 5 μm .

O cimento utilizado no estudo de Simões (2013), foi o CPV ARI. O traço adotado foi de 1:1,96:2,63 (aglomerante, areia e brita), em massa, com fator água/cimento de 0,53. Os teores de resíduo utilizados na produção de concretos foram de 5, 10 e 15%. Foram avaliadas a trabalhabilidade e a resistência à compressão axial (aos 3, 7, 28, 91 e 270 dias de idade).

Com base nos abatimentos dos concretos, Simões (2013) verificou que houve uma diminuição da trabalhabilidade das misturas com a incorporação do resíduo de vidro. Para manter a trabalhabilidade foi necessário a utilização de aditivo superplastificante. O autor justifica essa redução na trabalhabilidade, devido à elevada superfície específica das

partículas de vidro. No que se refere à resistência à compressão axial, o autor notou uma redução na resistência dos concretos, quanto maior o percentual de substituição de cimento pelo resíduo de vidro. O autor atribuiu este comportamento à diminuição da formação de produtos hidratados com a diminuição do teor de cimento nas misturas.

Também foi analisada por Simões (2013), a microestrutura dos concretos (aos 28, 91 e 270 dias de idade), através de micrografias obtidas por MEV. De acordo com o autor a incorporação do resíduo de vidro aumentou o refinamento dos poros dos concretos, principalmente em idades mais avançadas. O autor comentou que, embora a análise da microestrutura aponte uma maior densificação das matrizes com incorporação do resíduo de vidro, não foi possível correlacionar esse resultado com os de resistência à compressão.

Kamali e Ghahremaninezhad (2015) avaliaram o comportamento mecânico e de durabilidade de concretos com incorporação de dois tipos de resíduo de vidro em substituição ao cimento. Foram utilizados resíduo de fibra de vidro (GP1), com massa específica de $2,6 \text{ g/cm}^3$, e resíduo de vidro de garrafas (GP2), com massa específica de $2,5 \text{ g/cm}^3$. De acordo com os autores o tamanho médio das partículas dos resíduos foi $8,4 \mu\text{m}$. A composição química dos resíduos de vidro é apresentada na tabela 23.

Tabela 23 Composição química dos resíduos de vidro GP1 e GP2

Composição (%)	Tipo de resíduo	
	GP1	GP2
SiO ₂	50-55	50-80
Al ₂ O ₃	15-20	01-10
Fe ₂ O ₃	< 1	< 1
CaO	20-25	5-15
MgO	< 1	< 1,5
Na ₂ O	< 1	1-15
K ₂ O	< 0,2	< 1
SO ₃	< 0,1	-
Perda ao fogo	< 0,5	< 1

Fonte: Kamali e Ghahremaninezhad (2015).

No seu estudo, Kamali e Ghahremaninezhad (2015), utilizaram cimento CP I. O traço do concreto adotado foi de 1:2,44:3,19 (aglomerante, areia e brita), em massa, com relação água/aglomerante de 0,5. Os teores de resíduo utilizados foram de 5, 10, 15 e 20%, em massa. Os concretos foram avaliados quanto à resistência à compressão e à flexão (aos 7, 28 e 91 dias), expansão por RAS, permeabilidade ao cloreto e quanto à resistividade elétrica.

Kamali e Ghahremaninezhad (2015) observaram que os concretos com resíduo de vidro apresentaram maior resistência à compressão e à flexão, principalmente em idades mais avançadas. Os concretos com resíduo GP1 apresentaram resistência à compressão superior aos demais concretos (referência e GP2), em todas as idades avaliadas. Os autores atribuíram esse comportamento à atividade pozolânica apresentada pelos resíduos de vidro.

No que se refere às características de durabilidade, Kamali e Ghahremaninezhad (2015) comentaram que as argamassas incorporação dos resíduos de vidro em substituição ao cimento não excederam o limite de expansão conforme estabelecido pela ASTM C 1260, reduziu permeabilidade ao cloreto e aumentou a resistividade elétrica do concreto. Os autores atribuíram a redução da permeabilidade dos concretos com incorporação de GP1 ou GP2, à melhoria da microestrutura, decorrente da atividade pozolânica dos resíduos estudados.

Quanto ao ensaio de RAS, observaram que a expansão dos concretos com resíduo de vidro não excedeu o limite permitido pela ASTM C 1260. Este fato foi atribuído ao tamanho das partículas, tendo atuado como pozolana.

Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016) desenvolveram um estudo no qual verificaram a influência da utilização de resíduo de vidro, como substituição parcial do cimento, em matrizes cimentícias. Os autores utilizaram resíduo de vidro de construção e demolição, cuja massa específica foi de 2,62 g/cm³. A composição química do resíduo é apresentada na tabela 24.

Tabela 24 Composição química do resíduo de vidro de construção e demolição

Composição (%)	Resíduo de vidro de construção e demolição
SiO ₂	71,40
Al ₂ O ₃	2,54
Fe ₂ O ₃	0,37
CaO	11,20
MgO	1,60
Na ₂ O	12,25
K ₂ O	0,36
SO ₃	0,16
Perda ao fogo	0,82

Fonte: Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016).

A granulometria do resíduo de vidro está apresentada na figura 15.

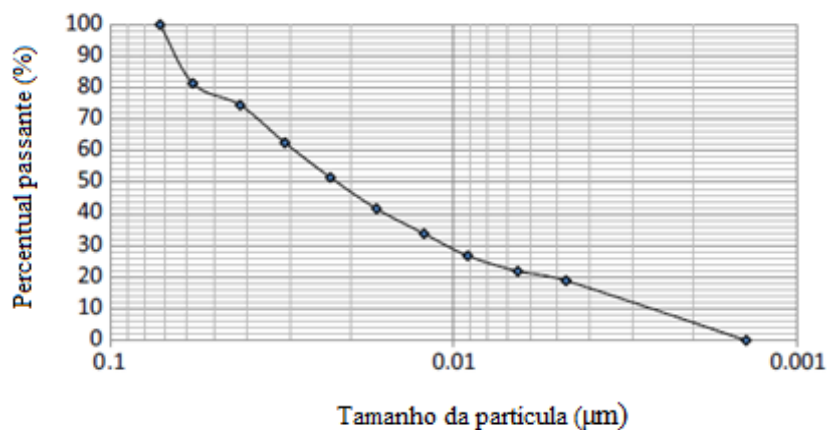


Figura 15 Curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro (ALIABDO; ELMOATY; ABOSHAMA, 2016)

Verifica-se na figura 15 que o resíduo é composto por partículas finas de vidro (< 75 µm).

Neste estudo foi utilizado cimento CP I. Os traços, em massa, foram de 1:1,57:2,35 (33 MPa) e 1:2,05:3,1 (45 MPa), com relação água/cimento de 0,50 e 0,35, respectivamente. Os teores de substituição de cimento por resíduo de vidro foram 5, 10, 15, 20 e 25%, em massa. Foram avaliados a trabalhabilidade, a resistência à compressão, aos 7, 28 e 56 dias de idade, a absorção de água e o índice de vazios dos concretos.

Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016) chegaram às seguintes conclusões:

- houve redução da trabalhabilidade quanto maior foi o teor de resíduo de vidro no concreto. Foi necessário, portanto, a utilização de um aditivo superplastificante, no teor de 1,8%, em relação à massa do cimento, para manter a trabalhabilidade. Os autores justificam a perda de trabalhabilidade devido à geometria das partículas de vidro, uma vez que a sua elevada angulosidade contribuiu para redução da mobilidade das partículas;
- a resistência à compressão dos concretos com até 10% de resíduo de vidro foi maior do que a do concreto de referência. Os autores atribuíram este aumento da resistência à atividade pozzolânica e ao efeito fíler desempenhado pelo resíduo de vidro finamente moído. Os autores não justificaram porque os concretos com mais de 10% de resíduo apresentaram menor resistência à compressão, em relação ao concreto de referência;
- a incorporação do resíduo de vidro em teores de até 15% diminuiu a permeabilidade e a porosidade total dos concretos. Os autores atribuíram a melhora no desempenho destas propriedades ao refinamento dos poros, como resultado do efeito fíler e da reação pozzolânica do resíduo de vidro utilizado. Quando comparado esses resultados aos

resultados obtidos para a resistência à compressão, comentam que o resíduo de vidro teve um efeito notório sobre a densidade dos concretos, principalmente para os concretos de 45 MPa.

No quadro 4 é apresentado um resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento na produção de concretos, com os respectivos resultados.

Quadro 4 Resumo dos estudos de utilização do resíduo de vidro em substituição ao cimento, na produção de concretos

Autores	Características	Comportamento dos concretos com resíduo em relação ao concreto de referência
Shao <i>et al.</i> (2000)	Resíduo de vidro: lâmpada fluorescente Granulometria: 150, 75 e 38 μm Teor sub. do cimento (%): 30 (massa) Cimento: CP I Traço: 1:2,27:4,23 (massa) Rel. a/c: 0,75	maior resistência à compressão; ocorreu RAS, exceto nos concretos com resíduo de diâmetro médio de 38 μm
Antônio (2012)	Resíduo de vidro: plano recozido Granulometria: aprox. 10 μm Teor sub. do cimento (%): 5, 10, 15 e 20 (massa) Cimento: CPV ARI Traço: 1:2,05:2,79 (massa) Rel. a/c: 0,51	menor resistência à compressão
Simões (2013)	Resíduo de vidro: para-brisa Granulometria: aprox. 5 μm Teor sub. do cimento (%): 5, 10 e 15 (massa) Cimento: CPV ARI Traço: 1:1,96:2,63 (massa) Rel. a/c: 0,53	menor trabalhabilidade; menor resistência à compressão
Kamali e Ghahremaninezhad (2015)	Resíduo de vidro: fibra de vidro e garrafas Granulometria: aprox. 8,4 μm Teor sub. do cimento (%): 5, 10, 15 e 20 (massa) Cimento: CP I Traço: 1:2,44:3,19 (massa) Rel. a/c: 0,50	maior resistência à compressão e à flexão; menor permeabilidade; não ocorreu RAS
Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016)	Resíduo de vidro: construção e demolição Granulometria: 1,5-70 μm Teor sub. do cimento (%): 5, 10, 15, 20 e 25 (massa) Cimento: CP I Traço (2): 1:1,57:2,35 e 1:2,05:3,1 (massa) Rel. a/c (2): 0,50 e 0,35	menor trabalhabilidade; maior resistência à compressão para teores de resíduo de 5 e 10%, para os traços 1 e 2, respectivamente; menor permeabilidade, para teores de resíduo de até 15%

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

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

- a composição química e a massa específica dos resíduos de vidro variam um pouco, conforme o método de prensagem adotado na fabricação do produto. Os resíduos de vidro plano (construção e demolição) e de embalagens (garrafas) apresentaram um teor de sílica de 72% e massa específica de 2,52 g/cm³. O resíduo de vidro de tubo catódico apresentou um teor de sílica de 63% e massa específica de 3,00 g/cm³, associa-se a este valor a presença de chumbo no resíduo. O resíduo de fibra de vidro apresentou o menor teor de sílica, cerca de 55%, e uma massa específica de 2,60 g/cm³.
- o teor de álcalis (Na₂O) presente no resíduo de vidro é bastante elevado podendo provocar expansões por RAS nas misturas cimentícias. A reação não se manifestou quando a granulometria do resíduo foi inferior 75 µm. A sílica presente nas partículas nessa faixa granulométrica reage com o hidróxido de cálcio (desenvolve atividade pozolânica);
- ao equiparar a distribuição granulométrica do resíduo com a do cimento, o resíduo de vidro tende a apresentar a maior superfície específica, devido a maior irregularidade da suas partícula;
- a consistência das misturas tende a diminuir com o aumento do teor de resíduo de vidro presente, devido a maior superfície específica e a maior irregularidade das suas partículas;
- alguns autores como Ismail e Al-Hashmi (2009), utilizando resíduo de vidro de tubo catódico, Taha e Nounu (2010), utilizando resíduo de vidro de garrafas, Corinaldesi *et al.* (2005), utilizando resíduo de vidro de construção e demolição e Penacho (2012), utilizando resíduo de vidro plano recozido, concluíram que substituições de até 50% de areia por resíduo de vidro foram as que produziram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico das matrizes cimentícias;
- autores como Kamali e Ghahremaninezhad (2015) e Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016), utilizando resíduo de vidro de garrafas, concluíram que substituições de até 20% de cimento pelo resíduo de vidro foram as que produziram os melhores resultados quanto ao desempenho mecânico das matrizes

cimentícias. Por outro lado, Parghi e Alan (2016) obtiveram melhores resultados para misturas com incorporação de até 25% de resíduo de vidro em substituição ao cimento;

- a resistência à compressão das argamassas e concretos com incorporação de resíduo de vidro com fina granulometria ($< 75 \mu\text{m}$) tende a aumentar em idades mais avançadas, devido à atividade pozolânica do resíduo;
- das propriedades mecânicas avaliadas, o módulo de elasticidade foi a menos influenciada com a incorporação do resíduo de vidro em matrizes cimentícias;
- a retração por secagem das misturas cimentícias tende a aumentar com o aumento do teor de resíduo de vidro. Principalmente para teores elevados de resíduo (acima de 30%). Segundo Penacho (2012) isso acontece devido ao refinamento dos poros capilares decorrentes da incorporação do resíduo de vidro. Por esta mesma razão, a permeabilidade e a absorção de água por capilaridade da matriz cimentícia, tende a diminuir com a incorporação de resíduo de vidro em fina granulometria;
- a incorporação do resíduo de vidro em fina granulometria torna a estrutura das matrizes cimentícias mais densa, devido ao preenchimento dos poros por efeito fíler ou por silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, formado através das reações pozolânicas.

Assim, de acordo com os resultados dos estudos desenvolvidos por Shao *et al.* (2000), Ismail e Al-Hashmi (2009), Oliveira, Gomes e Santos (2012), Matos e Coutinho (2012), Kamali e Ghahremaninezhad (2015), Aliabdo, Elmoaty e Aboshama (2016), Parghi e Alan (2016) e Zhao e Poon (2017), o resíduo de vidro possui potencial para substituir materiais como a sílica ativa e as cinzas volantes em matrizes cimentícias.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental estabelecido para atender ao objetivo geral deste estudo envolveu a caracterização dos materiais secos, que foram utilizados para produção das argamassas, assim como a determinação das propriedades das argamassas nos estados fresco e endurecido, conforme apresentado no fluxograma da figura 16.

O ensaio de análise química do resíduo foi realizado no Laboratório de Catálise e Materiais, da Universidade Federal da Bahia, a difração de raios-X (DRX) e granulometria à laser foram realizados no Laboratório de Mineralogia e Geoquímica Aplicada, da Universidade Federal do Pará. Os demais ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais, da Universidade Estadual de Feira de Santana.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente através da análise de variância (ANOVA) e da comparação múltipla de médias, através do teste de Tukey, utilizando o software STATISTIC 10.

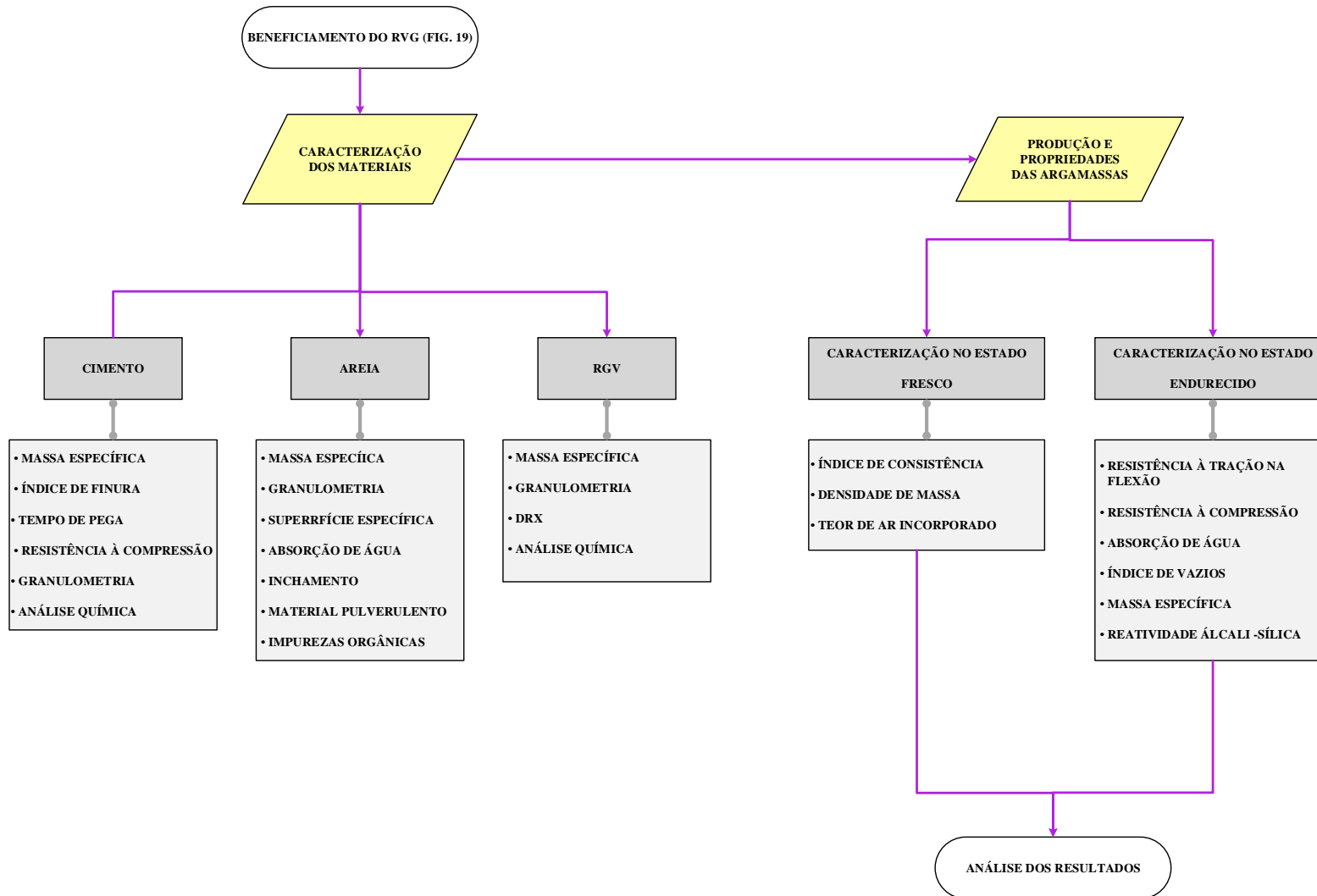


Figura 16 Fluxograma do programa experimental

3.1 MATERIAIS

Para realização do presente trabalho foram utilizados cimento Portland, areia quartzosa, resíduo de vidro de garrafas (RVG) e água. Os materiais secos foram caracterizados segundo as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, conforme descrito a seguir.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na confecção das argamassas foi o CP II Z-32, que atende as especificações da norma NBR 11578 (ABNT, 1991). A escolha desse tipo de cimento se deu por ser comumente disponível no mercado regional e nacional. A caracterização física e química do cimento utilizado nesta pesquisa foi realizada pelo fabricante, cujos dados estão apresentados na tabela 25.

Tabela 25 Caracterização do cimento CP II Z-32

Propriedade		Valor	Método de Ensaio	NBR 11578 (ABNT,1991)
Análise física e mecânica				
Massa específica (g/cm ³)		3,03	NBR NM 23 (ABNT, 2001)	N.E.
Finura	Área específica - Blaine (cm ² /g)	3215	NBR NM 76 (ABNT, 1998)	≥ 2500
Tempos de pega	Início de pega (min)	186	NBR NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
	Fim de pega (min)	250		≤ 600
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	28,3	NBR 7215 (ABNT, 1996)	≥ 20
	28 dias	36,5		≥ 32
Granulometria	# 200(%)	2,9	NBR 11579 (ABNT, 2012)	≤ 6
	# 325(%)	9,3	NBR 9202 (ABNT, 1985)	N.E.
Análise química				
	SiO ₂ (%)	19,39		N.E.
	CaO(%)	56,03		N.E.
	MgO(%)	2,98		≤ 6,5
	Al ₂ O ₃ (%)	6,07	NBR 14656 (ABNT, 2001)	N.E.
	Fe ₂ O ₃ (%)	8,43		N.E.
	Na ₂ O(%)	0,26		N.E.
	K ₂ O(%)	0,79		N.E.
	SO ₃ (%)	3,35		≤ 4,0

Nota: N.E. – Não especificado.

Fonte: Lafarge-Holcim (2017).

3.1.2 Agregado natural

Como agregado natural foi utilizado areia quartzosa, extraída do município de Alagoinhas – Bahia, comumente utilizada na região de Feira de Santana. A caracterização do agregado miúdo natural foi realizada de acordo com as normas brasileiras vigentes. Os resultados estão apresentados na tabela 26.

Tabela 26 Características da areia utilizada no estudo

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)	
4,8	0	
2,4	0	
1,2	0	
0,6	12	
0,3	68	
0,15	94	

Propriedades	Resultados	Métodos de ensaio
Dimensão máxima característica (mm)	1,2	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura	1,77	
Massa específica (g/cm ³)	2,62	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Coefficiente de inchamento médio	1,30	NBR 6467 (ABNT, 2003)
Umidade crítica (%)	1,50	
Material pulverulento (%)	2,10	NBR NM 46 (ABNT, 2003)

Observa-se que se trata de uma areia fina (módulo de finura igual a 1,77).

Na figura 17 é apresentada a curva granulométrica da areia.

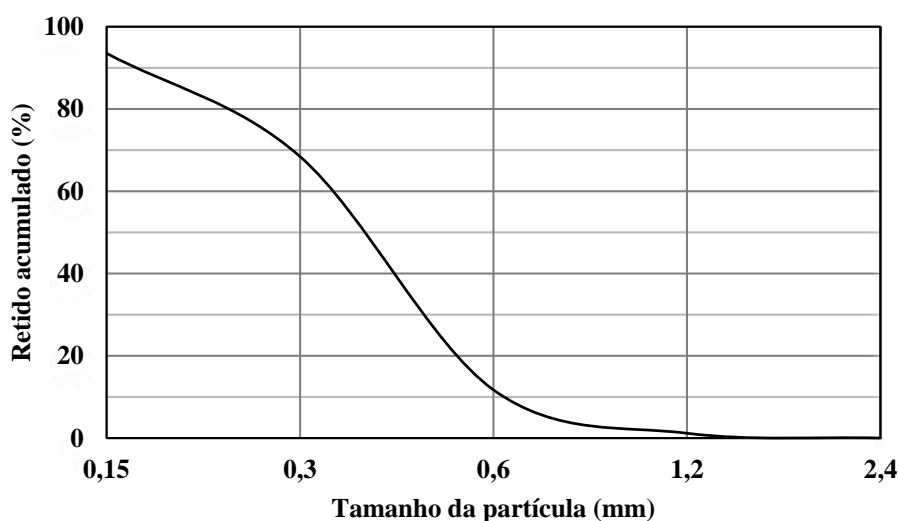


Figura 17 Curva granulométrica da areia utilizada

Com base na curva granulométrica pode-se notar que a areia apresenta granulometria fina e descontínua.

Com o intuito de verificar a estrutura dos compostos do agregado natural realizou-se o ensaio de difração de raios-X. O difratograma obtido para a areia está ilustrado na figura 18.

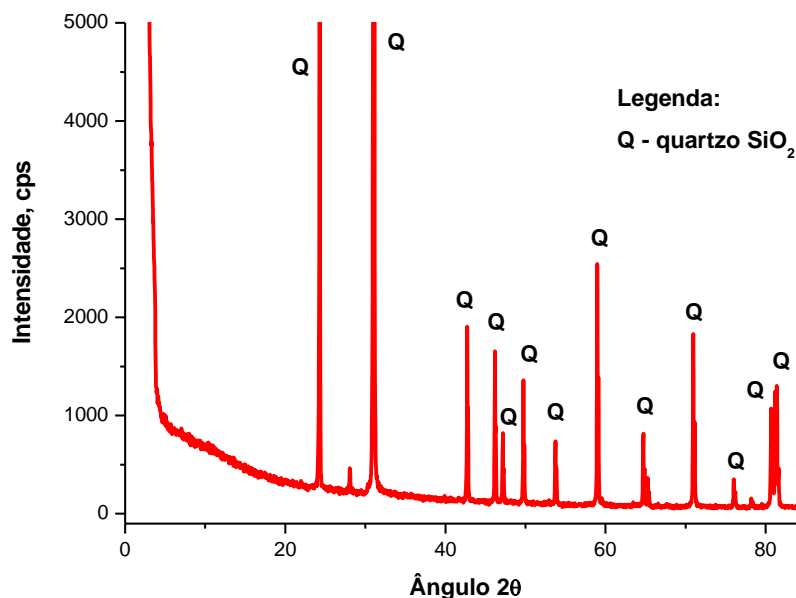


Figura 18 Difratograma da areia utilizada

Como era de se esperar, a estrutura da areia é tipicamente cristalina, com incidência de cristais de quartzo (SiO_2).

3.1.3 Resíduo de vidro de garrafa - RVG

O resíduo empregado para o desenvolvimento deste trabalho foi proveniente de garrafas de vidro sodo-cálcico usadas originalmente para o envase de cerveja. As garrafas foram coletadas na Equipe de Educação Ambiental da Universidade Estadual de Feira de Santana e em alguns bares da cidade. Foram selecionadas garrafas de cor marrom, uma vez que, o maior volume de resíduo de vidro de garrafas gerado no Brasil apresenta essa coloração.

3.1.3.1 Beneficiamento do RVG

Inicialmente as garrafas de vidro foram submersas em água, para remover rótulos de papel ou plástico e eliminar contaminantes. Após a lavagem as garrafas foram secas ao ar. Após a secagem, foram quebradas, com a utilização de uma barra de ferro, visando

facilitar o processo de trituração. Em seguida, os fragmentos de vidro passaram pelo processo de trituração, em um moinho de martelos com peneira de abertura 0,6 mm. Logo, o RVG investigado neste estudo era de partículas com tamanhos inferiores a 0,6 mm. A figura 19 ilustra aspectos das etapas do beneficiamento do resíduo de vidro de garrafas.



Figura 19 Aspectos do beneficiamento do RVG: (a) lavagem das garrafas; (b) garrafas após lavagem e secagem; (c) quebra das garrafas para trituração; (d) trituração no moinho de martelo; (e) RVG passante na peneira de 0,6 mm

3.1.3.2 Caracterização do RVG

Após a trituração, a fração do RVG passante na peneira 0,6 mm, foi homogeneizada e armazenada em uma bombona de plástico vedada, para posterior utilização. A partir daí os ensaios de caracterização foram realizados.

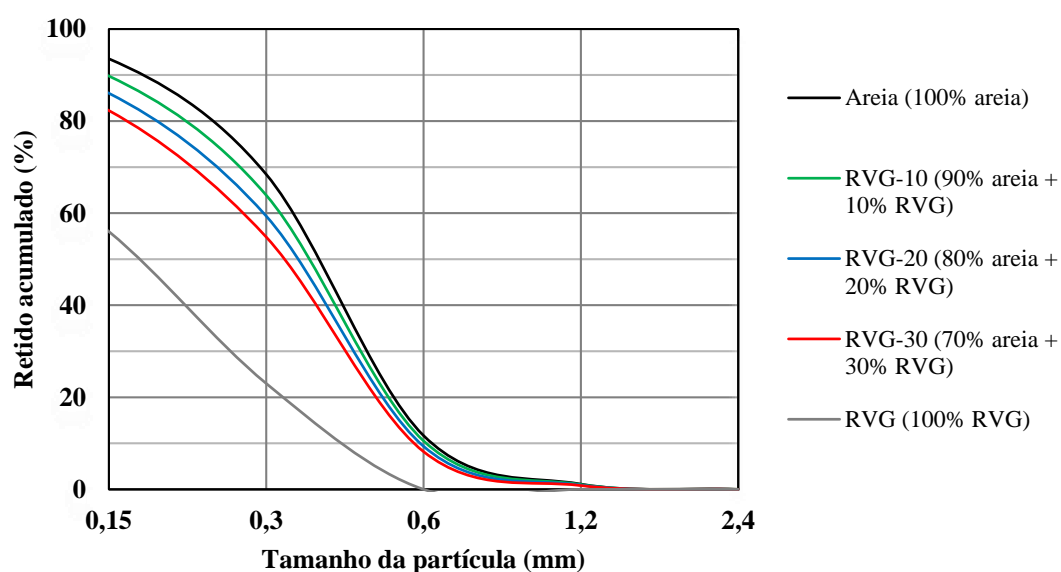
3.1.3.2.1 Granulometria

A granulometria do resíduo foi realizada, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), apresentado na tabela 27.

Tabela 27 Granulometria do RVG

Abertura da peneira (mm)	Retido acumulado (%)
0,6	0
0,3	24
0,15	55

Verifica-se que a granulometria do RVG é muito mais fina do que a da areia utilizada. Há uma grande concentração da fração fina ($< 0,15$ mm) no RVG (45%). Porcentagem muito superior ao da areia, que foi de 6%. A figura 20 mostra a composição granulométrica dos agregados utilizados neste estudo.

**Figura 20** Composição granulométrica dos agregados

Verifica-se que, com o acréscimo de RVG, houve uma atenuação da descontinuidade da granulometria da areia.

A fração do RVG inferior a 0,15 mm foi submetida a uma análise granulométrica à laser (granulômetro Analysette). A curva granulométrica da fração inferior a 0,15 mm está apresentada na figura 21.

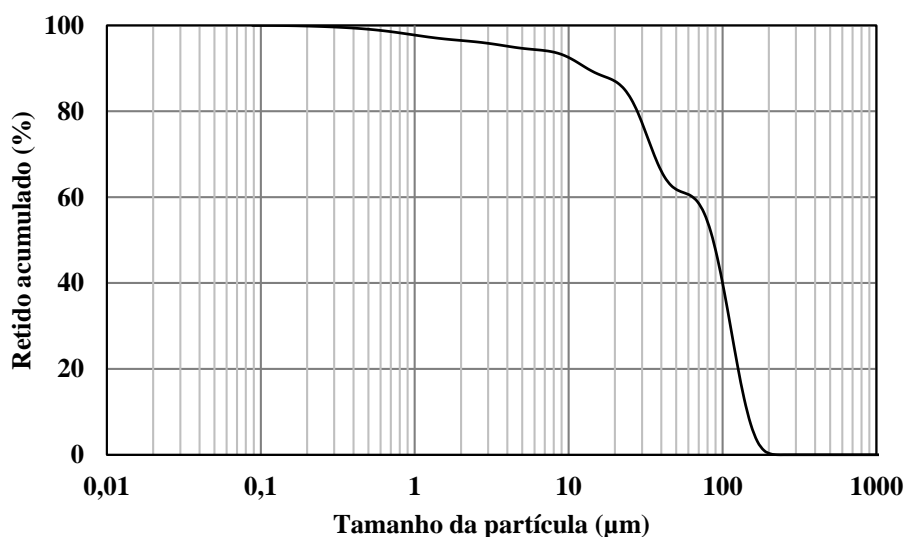


Figura 21 Curva granulométrica da fração fina do RVG

Com base nos resultados da granulometria à laser, o diâmetro médio das partículas inferiores a 0,15 mm é de 80 µm, e cerca de 38% dos grãos dessa fração tem dimensão inferior a 45 µm.

3.1.3.2.2 Caracterização química, física e mineralógica

A caracterização química foi realizada por meio de fluorescência de raios-X (FRX), por dispersão de energia Shimadzu EDX720, operando com fonte de ródio. As amostras na forma de pó foram acondicionadas em porta-amostras de polipropileno, fornecidos pelo fabricante. As amostras foram realizadas de modo semi-quantitativo. Os resultados desses ensaios estão apresentados na tabela 28.

Tabela 28 Composição química do RVG

Composição (%)	RVG
SiO ₂	61,6
CaO	18,3
Na ₂ O	11,6
Fe ₂ O ₃	3,5
Al ₂ O ₃	2,8
K ₂ O	0,8
Sc ₂ O ₃	0,7
TiO ₂	0,2
SrO	0,1
SO ₃	0,1
MnO	0,1
ZrO ₂	0,1

Pode-se observar que o teor de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 é de 67,9%, o que indica, do ponto de vista químico, que o RVG pode ser considerado uma pozolana, respeitadas as demais exigências da NBR 12653 (ABNT, 2014).

Nota-se, um alto teor de Na_2O (11,6%) no RVG. A NBR 12653 (ABNT, 2014) estabelece o limite de 1,5% para os materiais pozolânicos. Altos teores de Na_2O também foram observados na composição química do resíduo de vidro de garrafas de cor marrom estudados por Du e Tan (2013a) e Park e Lee (2004). O que indica a possibilidade desse material para desenvolver reação álcali-sílica.

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NBR NM 23 (ABNT, 2001), obtendo-se o valor de $2,52 \text{ g/cm}^3$.

Com o intuito de verificar a estrutura dos compostos do RVG realizou-se o ensaio de difração de raios-X. O difratograma obtido para o RVG está ilustrado na figura 21.

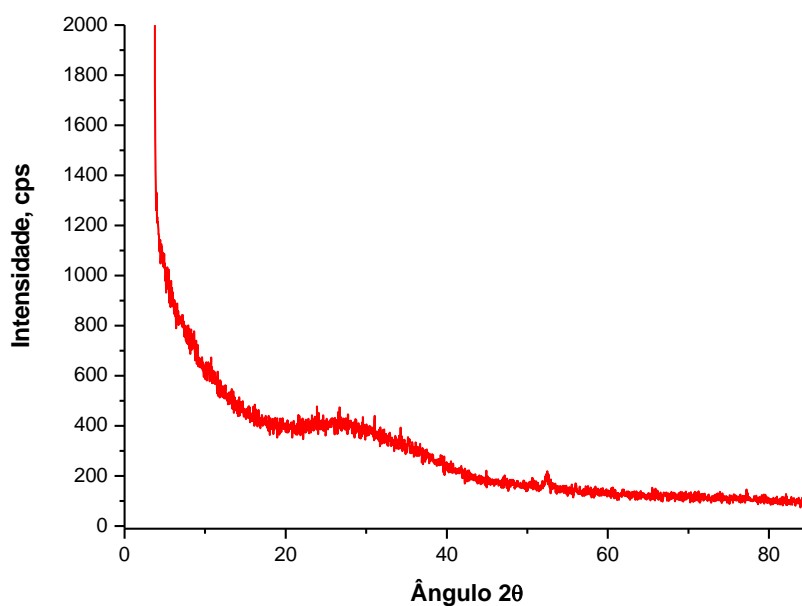


Figura 22 Difratograma do RVG

Observando o difratograma verifica-se que o RVG é um material amorfo, conforme esperado.

3.2 DOSAGEM E PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS

O traço adotado para as argamassas foi de 1:5 (cimento:agregado), em massa, com um consumo de cimento igual a 300 kg/m^3 . Foi escolhido este traço, por ser frequente para argamassa de revestimento. A substituição do agregado natural pelo RVG ocorreu

nos teores de 0, 10, 20, e 30%, em massa. Utilizou-se a nomenclatura REF, RVG-10, RVG-20 e RVG-30, para expressar, respectivamente, as argamassas com 0, 10, 20, e 30% de resíduo de vidro de garrafa.

A mistura dos materiais foi realizada em uma argamassadeira com capacidade máxima de 20 litros. Inicialmente foi colocado o cimento com a água e misturado por 30 segundos na velocidade baixa. Em seguida foram adicionados os agregados e misturados por mais 30 segundos na velocidade baixa. Após esse tempo, foi paralisada a argamassadeira e retirado a argamassa que estava aderida às paredes da cuba, por 30 segundos. Logo em seguida a argamassadeira foi ligada em velocidade alta e o material misturado por mais 2 minutos. No caso das argamassas com RVG, o resíduo foi previamente homogeneizado com a areia, a seco.

O ensaio de determinação do índice de consistência das argamassas foi realizado de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2005), sendo fixado o índice de consistência de 260 ± 5 mm. Os resultados estão apresentados na tabela 29.

Tabela 29 Resultados do ensaio de índice de consistência

Argamassa	Índice de consistência - parâmetro determinado (mm)	Índice de consistência obtido (mm)	Fator a/c
REF	260±5	265	0,88
RVG-10		263	
RVG-20		265	
RVG-30		257	

Pode-se observar que para atender a faixa de consistência previamente fixada, todas as argamassas utilizaram relação água/cimento de 0,88. Logo, não houve influência do resíduo na faixa de consistência estabelecida para as argamassas. Nas argamassas com RVG, apesar da superfície específica do resíduo ser maior do que a da areia, a melhoria na granulometria do conjunto evitou a maior demanda de água.

Penacho (2012), ao avaliar a incorporação de resíduo de vidro plano recozido nos teores de 20, 50 e 100%, em substituição a areia, também encontrou comportamento semelhante. O espalhamento das argamassas se manteve na mesma faixa, para todos os teores de resíduo utilizados. O autor comentou que, apesar do resíduo ter apresentado maior superfície específica, a areia apresentou maior taxa de absorção de água do que as partículas de vidro.

3.2.1 Propriedades das argamassas no estado fresco

No estado fresco, foram determinadas a densidade de massa e o teor de ar incorporado, de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005). Os resultados apresentados correspondem às médias de duas determinações.

3.2.2 Propriedades das argamassas no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios e massa específica e expansão por reação álcali-sílica.

Na determinação das resistências à tração na flexão e à compressão, para cada mistura foram produzidos 3 corpos de provas prismáticos com dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm. Os corpos de prova foram moldados, adensados e curados e rompidos de acordo com o que estabelece a NBR 13279 (ABNT, 2005). Tanto aos 28, quanto aos 90 dias de idade, foram ensaiados 3 corpos de prova para resistência à tração na flexão e 6 corpos de prova para resistência à compressão. A ruptura foi realizada em uma prensa da marca SCHIMADZU, com capacidade de 100 kN.

A absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas foram determinados de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Para cada mistura foram moldados 3 corpos de provas cilíndricos 5 cm x 10 cm, desmoldados após 24 horas e colocados em cura úmida até 28 dias de idade.

A determinação da expansão devido à reação álcali-sílica (RAS) foi realizada pelo método acelerado, de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2009). Foram moldadas barras de argamassas, de 2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm. Depois de 24 horas de moldados, os corpos de prova foram desmoldados e colocados submersos em água destilada a 80 °C, por 24 horas. Após esse tempo, foi realizada a primeira leitura, como referência. Em seguida, as barras de argamassa foram imersas em uma solução de hidróxido de sódio 1 N (NaOH), a 80 °C, até a idade das leituras, que são 3, 6, 9, 12, 15, 16, 19, 22, 25, 27 e 30 dias. A figura 24 mostra um aspecto dos corpos de prova durante o ensaio.



(a)



(b)

Figura 23 Aspectos do ensaio de expansão por RAS: (a) barras imersas em solução; (b) medição

No capítulo subsequente serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados no programa experimental.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados das propriedades das argamassas no estado fresco: densidade de massa e teor de ar incorporado.

4.1.1 Densidade de massa

Os resultados médios de densidade de massa das argamassas produzidas neste trabalho estão apresentados na tabela 30. Salienta-se que os resultados individuais encontram-se no apêndice 1.

Tabela 30 Médias de densidade de massa das argamassas produzidas

Argamassa	Densidade de massa (kg/m ³) ± Sd (kg/m ³) (C.V. (%))
REF	1758 ± 1,22 (0,1)
RVG-10	1747 ± 3,00 (0,2)
RVG-20	1735 ± 0,27 (0,0)
RVG-30	1726 ± 1,50 (0,1)

Sd – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Observa-se que a densidade de massa das argamassas no estado fresco diminui com o aumento da porcentagem de substituição da areia por RVG. Com o intuito de verificar se a substituição da areia natural pelo RVG exerceu influência significativa nestes resultados foi realizada a análise de variância. Na tabela 31 estão apresentados os resultados da ANOVA.

Tabela 31 Análise de variância para densidade de massa

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Significância
Teor de RVG	3	378	59	6,591	S
Erro	4	6			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F_{cal} – Valor calculado de F; F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Pode-se observar que foi significativo o efeito do teor de resíduo na densidade de massa das argamassas produzidas.

Realizou-se também a comparação múltipla de médias e constatou-se que há diferença significativa entre as médias de densidade de massa das misturas produzidas, exceto entre os teores 20 e 30%.

A figura 24 apresenta o comportamento das argamassas quanto à densidade de massa.

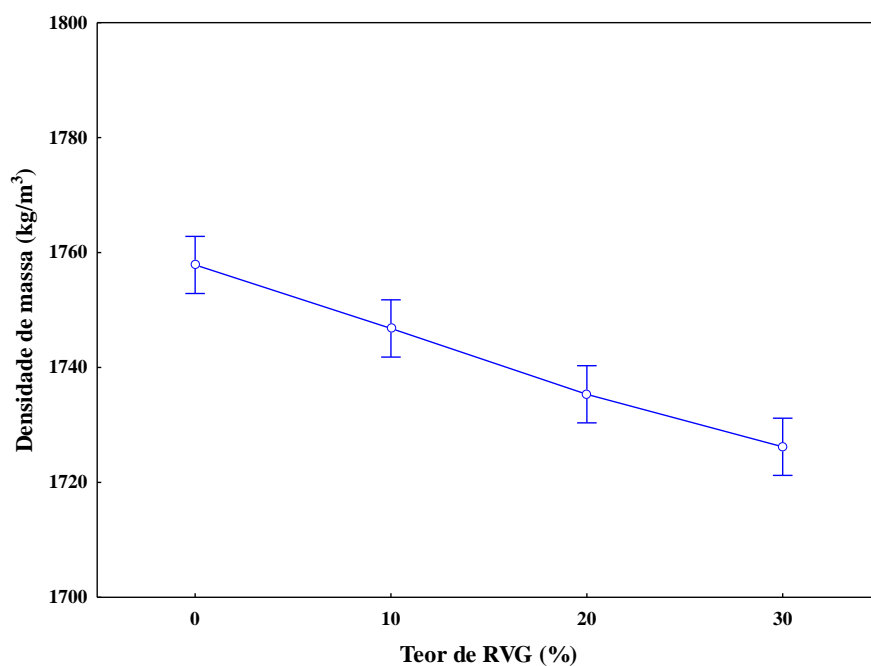


Figura 24 Efeito do teor de RVG na densidade de massa das argamassas produzidas

Foi determinada a densidade de massa relativa das argamassas, conforme apresentado na figura 25.

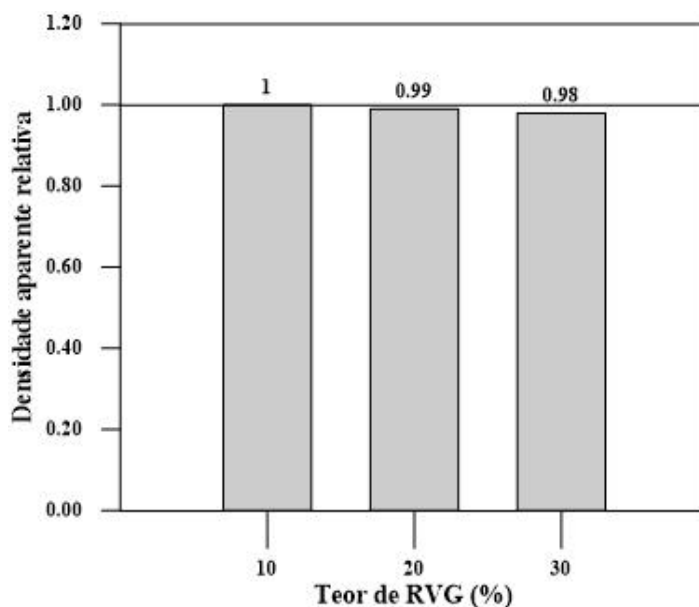


Figura 25 Densidade de massa relativa das argamassas produzidas

Pode-se observar que houve uma pequena redução na densidade de massa, das misturas com resíduo em comparação com a mistura de referência, chegando no máximo

a 2%, para argamassa com 30% de RVG. Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que a massa específica do RVG foi inferior a da areia (cerca de 4%).

Penacho (2012), também encontrou comportamento semelhante, ao utilizar resíduo de vidro plano em substituição a areia, nos teores de 20, 50 e 100%.

Por outro lado, Zhao e Poon (2017), notou que a utilização de resíduo de vidro de tubo catódico provocou um aumento da densidade de massa das argamassas. No entanto, neste estudo foi utilizado um resíduo de vidro com uma massa específica cerca de 16% superior a da areia.

4.1.2 Teor de ar incorporado

Os resultados médios do teor de ar incorporado das misturas encontram-se na tabela 32. Os resultados individuais constam no apêndice 2.

Tabela 32 Teor de ar incorporado médio das argamassas produzidas

Argamassa	Teor de ar incorporado (%) \pm Sd (%) (C.V. (%))
REF	20,4 \pm 0,00 (0,3)
RVG-10	20,7 \pm 0,00 (0,7)
RVG-20	21,0 \pm 0,00 (0,1)
RVG-30	21,3 \pm 0,00 (0,3)

Sd – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Pela análise da tabela conclui-se que as argamassas com incorporação de RVG apresentam maiores teores de ar incorporado, comparado a argamassa de referência.

Os valores obtidos para o teor de ar incorporado foram submetidos à análise de variância, cujos resultados estão apresentados na tabela 33.

Tabela 33 Análise de variância para teor de ar incorporado

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Significância
Teor de RVG	3	0,287	21,6	6,591	S
Erro	4	0,013			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F_{cal} – Valor calculado de F; F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Verifica-se que a substituição da areia natural pelo RVG exerceu influência significativa sobre os resultados de teor de ar incorporado das misturas produzidas.

Foi realizada também a comparação múltipla de médias dos resultados e constatou-se que a substituição da areia pelo RVG exerceu influência significativa sobre

o teor de ar incorporado entre as misturas de referência e 20% e 30% do resíduo. Logo, não houve influência entre as argamassas: referência e 10%; 10 e 20%; 20 e 30%.

A figura 26 ilustra o comportamento das argamassas, quanto ao teor de ar incorporado.

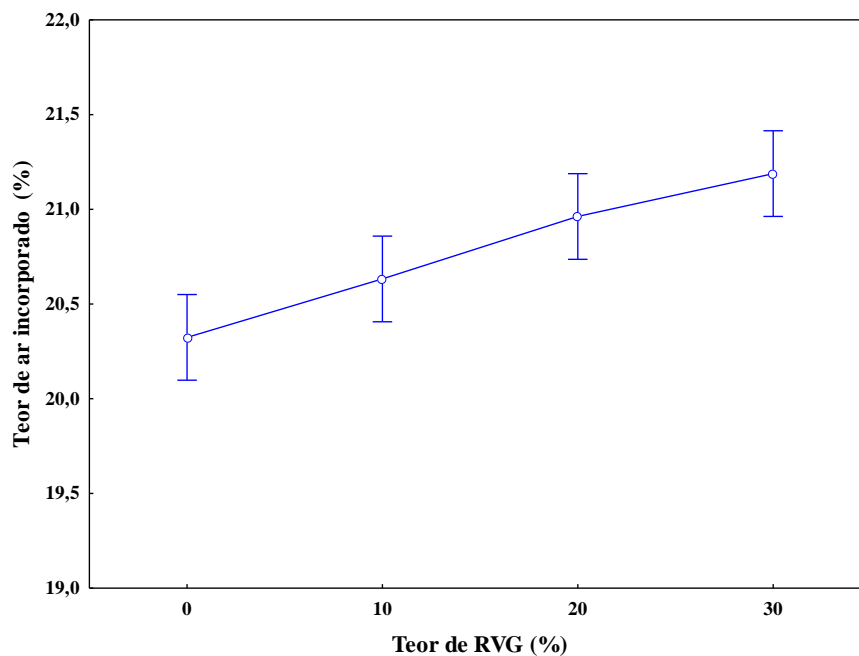


Figura 26 Efeito do teor de RVG sobre o teor de ar incorporado das argamassas produzidas

Determinou-se o teor de ar incorporado relativo das misturas produzidas, cujos resultados estão apresentados na figura 27.

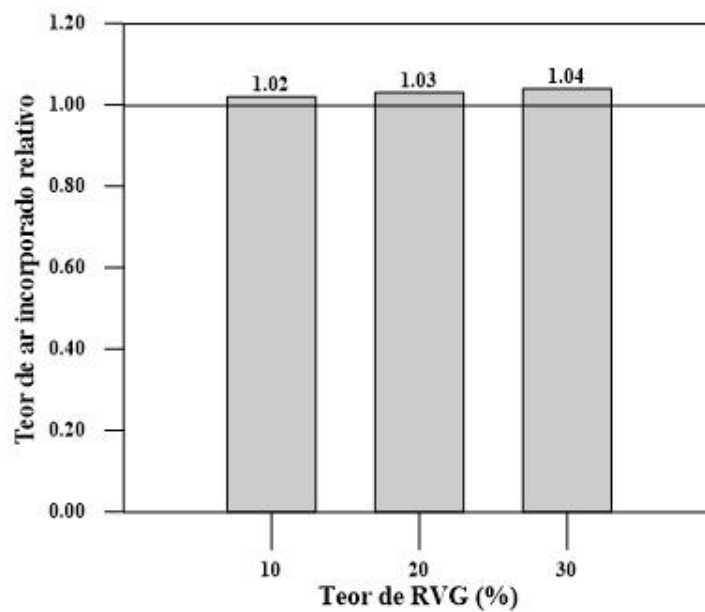


Figura 27 Teor de ar incorporado relativo das argamassas produzidas

Observa-se que quanto maior foi o teor de RVG na mistura, maior o teor de ar incorporado. A substituição da areia natural pelo RVG proporcionou um aumento de até 4% do teor de ar incorporado, para a mistura com teor de 30%. Apesar de ser significativo, o aumento é muito pequeno. Este comportamento pode ser atribuído ao fato do RVG apresentar grãos mais alongados, comparado com a areia utilizada, não favorecendo à saída de ar das misturas. Este resultado também permite justificar a pequena redução na densidade de massa no estado fresco das misturas com o resíduo.

Penacho (2012), no seu estudo observou comportamento semelhante, tanto em relação ao teor de ar incorporado, quanto à densidade de massa. O teor de ar incorporado aumentou, enquanto o teor de ar incorporado diminuiu.

4.2 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados das propriedades das argamassas no estado endurecido: resistência à tração na flexão, resistência à compressão, absorção de água e índice de vazios e expansão devido à reação-sílica.

4.2.1 Resistência à tração na flexão

Os resultados médios de resistência à tração na flexão estão demonstrados na tabela 34. Salienta-se que os resultados individuais estão no apêndice 3.

Tabela 34 Resultados de médias de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas

Argamassa	Resistência à flexão média (MPa) \pm Sd (MPa) (C.V.(%))	
	28 dias	90 dias
REF	3,84 \pm 0,02 (0,4)	4,96 \pm 0,05 (1,0)
RVG-10	4,07 \pm 0,02 (0,5)	6,67 \pm 0,15 (2,3)
RVG-20	4,53 \pm 0,13 (2,9)	8,23 \pm 0,04 (0,5)
RVG-30	5,41 \pm 0,27 (5,0)	8,59 \pm 0,14 (1,7)

Sd – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação

Observa-se que as argamassas com RVG apresentaram maiores valores de resistência à tração na flexão, em relação à argamassa de referência.

Foi realizada a análise de variância para verificar estatisticamente se a idade e o teor de RVG tiveram influência significativa nos resultados de resistência à tração na flexão. Os resultados da ANOVA estão apresentados na tabela 35.

Tabela 35 Análise de Variância para resistência à tração na flexão

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Significância
A - Teor de RVG	3	7,840	301,44	3,24	S
B - Idade	1	42,168	1621,18	4,49	S
AB	3	1,861	71,55	3,24	S
Erro	16	0,026			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F_{cal} – Valor calculado de F; F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

Constatou-se que a idade e o teor de RVG influenciaram significativamente nos resultados de resistência à tração na flexão das argamassas produzidas.

Foi realizada a comparação múltipla de médias, com o intuito de verificar se houve diferença significativa entre as misturas. Constatou-se que para idade de 90 dias de cura houve influência da utilização do resíduo na resistência à tração na flexão, para todos teores utilizados. No entanto, para a idade de 28 dias, verificou-se que houve influência da utilização do resíduo na tração na flexão, entre as argamassas: referência e 20 e 30%; 10 e 30%.

A figura 28 mostra o comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão aos 28 e 90 dias de cura.

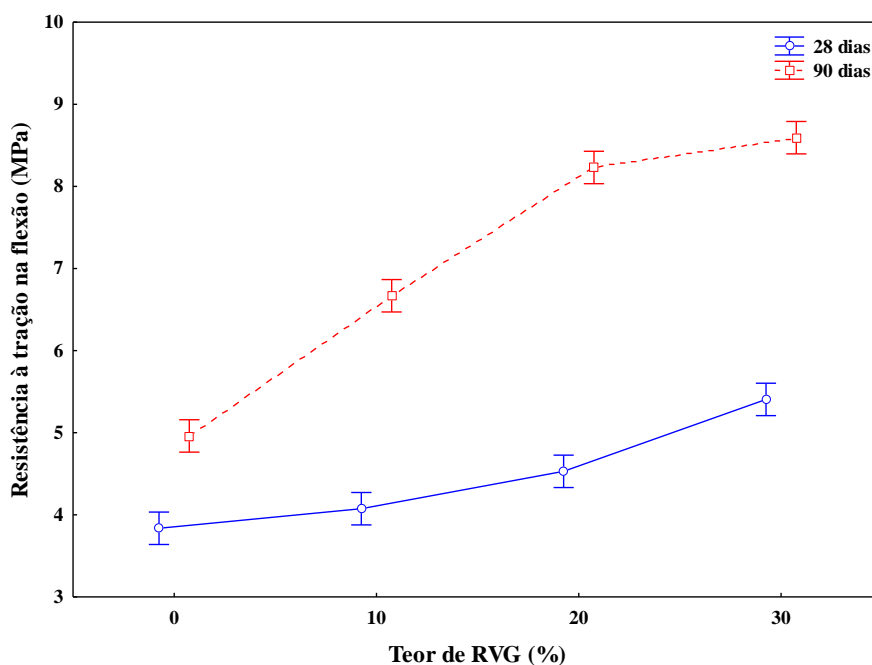


Figura 28 Comportamento das argamassas quanto à resistência à tração na flexão aos 28 dias e aos 90 dias de cura

Os resultados de resistência à tração na flexão relativa das misturas, para as idades de 28 e 90 dias, estão apresentados na figura 29.

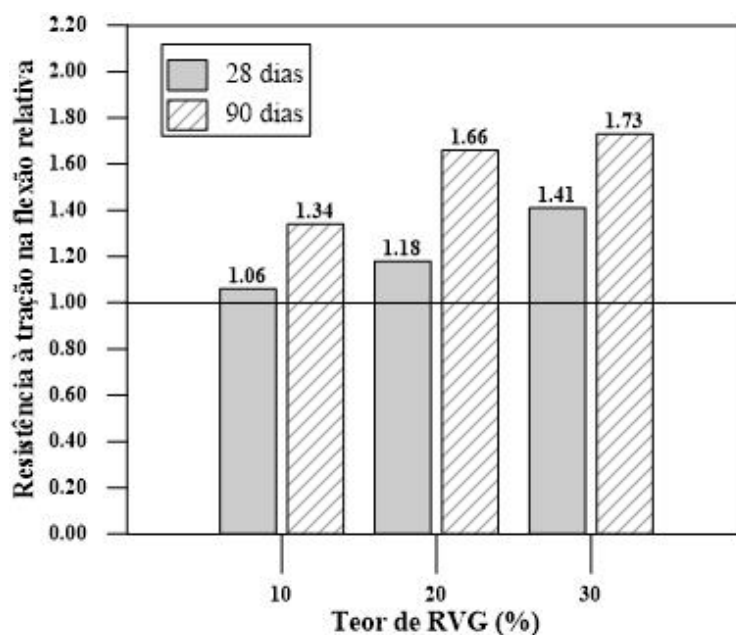


Figura 29 Resistência à tração na flexão relativa aos 28 e 90 dias de cura

Verifica-se que as argamassas com RVG apresentaram resistência à tração na flexão, tanto aos 28, quanto aos 90 dias de idade, superior a argamassa de referência, para todos os teores estudados. A argamassa com teor de incorporação de 30% de RVG apresentou um aumento de 41 e 73% aos 28 e 90 dias, respectivamente.

A melhora no comportamento da resistência à tração na flexão das argamassas contendo RVG, pode ser atribuído à atividade pozolânica das partículas finas do resíduo de vidro. A formação de C-S-H, a partir da reação, contribui para um maior refinamento dos poros, densificando a matriz. Há que se considerar também o efeito físico proporcionado pelas partículas do resíduo, que contribuiu com uma melhora no efeito de preenchimento, conseqüentemente, aumentado a resistência da argamassa.

Comportamento semelhante foi encontrado por Oliveira (2012), que verificou um aumento de 85% da resistência à tração na flexão tanto aos 28 quanto aos 90 dias, para a argamassas com adição de 20% de resíduo de vidro laminado, em relação ao volume de agregado, comparado com a argamassa de referência. O referido autor também atribuiu o aumento na resistência das argamassas com resíduo, ao potencial pozolânico e ao efeito fíler das partículas finas do resíduo de vidro.

Por outro lado, Du e Tan (2013a), ao substituírem 25% do agregado natural por resíduo de garrafas, concluíram que não houve diferença significativa entre a resistência à flexão da argamassa de referência e a argamassa com resíduo de vidro, aos 28 dias,

independente da cor do resíduo (verde, marrom ou transparente). Vale salientar, que os referidos autores utilizaram resíduo de vidro de granulometria superior à utilizada no presente estudo. Sendo assim, a ligação pasta/agregado é melhor, no presente estudo.

É importante destacar o comportamento das argamassas, em relação às idades de cura (28 e 90 dias). As argamassas com RVG apresentaram um crescimento muito maior da resistência à tração na flexão do que a argamassa de referência. Este fato reforça a justificativa da atividade pozolânica da fração fina do resíduo.

De modo semelhante, Ling e Poon (2012) observaram no seu estudo, um maior crescimento da resistência entre 28 e 90 dias, para as argamassas com resíduo de vidro de tubo catódico. Os autores atribuíram este comportamento à atividade pozolânica das partículas finas de vidro na pasta de cimento.

4.2.2 Resistência à compressão

Os resultados médios de resistência à compressão das argamassas produzidas estão apresentados na tabela 36. Os resultados individuais estão expostos no apêndice 4.

Tabela 36 Resultados de médias de resistência à compressão das argamassas

Argamassa	Resistência à compressão média (Mpa) ± Sd (MPa) (C.V.(%))	
	28 dias	90 dias
REF	6,88 ± 0,07 (1,0)	8,78 ± 0,22 (2,6)
RVG-10	8,43 ± 0,32 (3,8)	12,36 ± 0,49 (4,0)
RVG-20	9,79 ± 0,40 (4,1)	16,15 ± 0,27 (1,7)
RVG-30	11,37 ± 0,37 (3,3)	16,94 ± 0,26 (1,5)

Sd – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação.

Verifica-se que o incremento no teor de RVG proporcionou um aumento nos valores de resistência à compressão das argamassas.

Foi realizada a análise de variância para verificar estatisticamente se a idade e o teor de RVG influenciaram significativamente nos resultados de resistência à compressão. Os resultados da ANOVA estão apresentados na tabela 37.

Tabela 37 Resultados de ANOVA para a resistência à compressão das argamassas

Fator	GDL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Significância
A - Teor de RVG	3	96,763	597,08	2,84	S
B - Idade	1	235,255	1451,65	4,09	S
AB	3	11,094	71,55	2,84	S
Erro	40	0,026			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F_{cal} – Valor calculado de F; F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo.

Os resultados da ANOVA demonstraram que o teor de RVG e a idade de cura influenciaram significativamente na resistência à compressão das argamassas estudadas.

Além da ANOVA, foi realizada a comparação múltiplas de médias e constatou-se que há diferença significativa entre todas as médias de resistência à compressão das argamassas. Tanto para a idade de 28 dias, quanto para 90 dias de cura.

A figura 30 mostra o comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão.

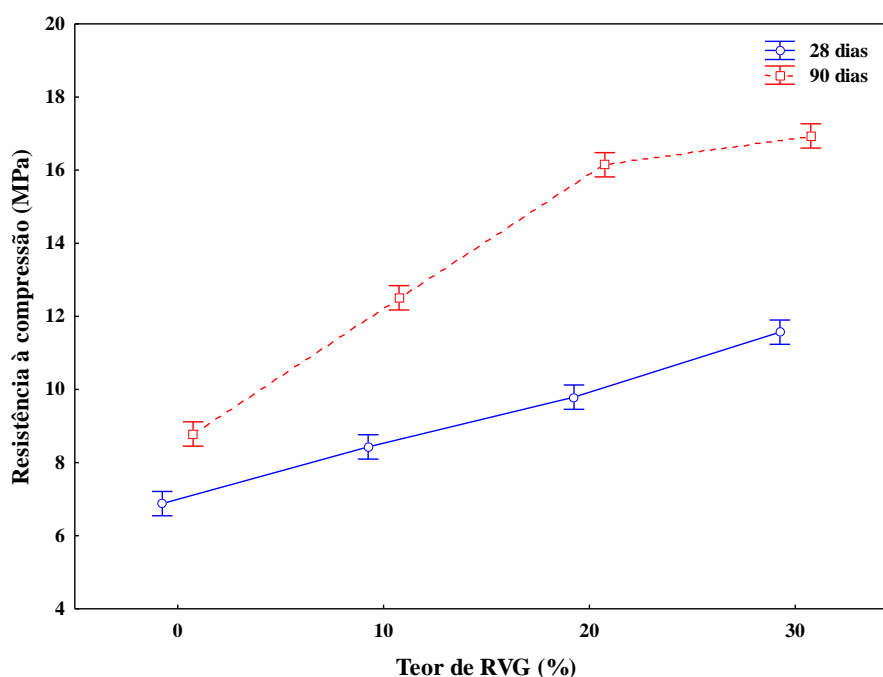


Figura 30 Comportamento das argamassas quanto à resistência à compressão aos 28 dias e aos 90 dias de cura

Os resultados de resistência à compressão relativa das misturas, para as idades de 28 e 90 dias, estão apresentados na figura 31.

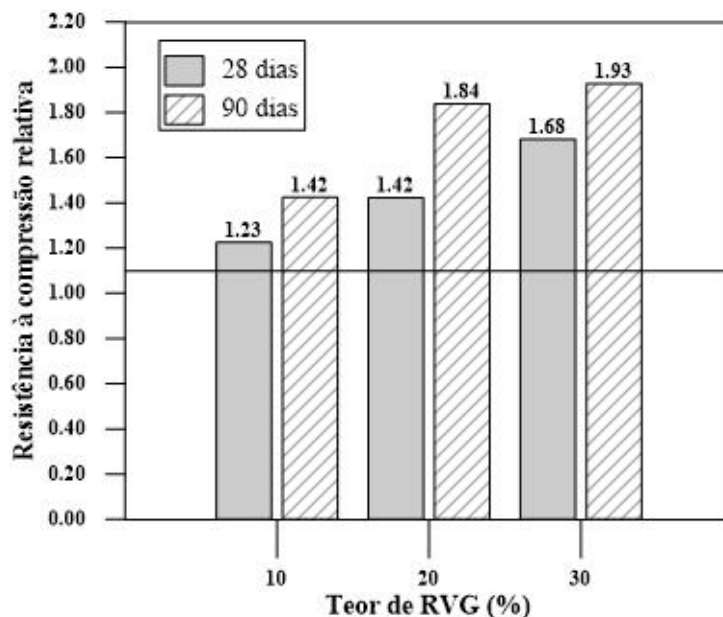


Figura 31 Resistência à compressão relativa aos 28 e 90 dias de cura

Para a idade de 28 dias, a substituição de 10, 20 e 30% de areia natural por RVG, proporcionou, respectivamente, aumento de 23, 42 e 68% na resistência à compressão, em relação à argamassa de referência. Para a idade de cura de 90 dias, as argamassas com os referidos teores apresentaram aumento de 42, 84 e 93%, respectivamente, na resistência à compressão. Este comportamento é semelhante ao de resistência à tração na flexão, item 4.2.1. O comportamento das argamassas, em relação às idades de cura (28 e 90 dias) também foi semelhante ao da tração na flexão. As argamassas com RVG apresentaram um crescimento muito maior de resistência à compressão do que a argamassa de referência. Portanto, o aumento na resistência pode ser atribuído à atividade pozolânica proporcionada pela fração fina do resíduo. Além do efeito de preenchimento pelas partículas do resíduo que contribuiriam com o aumento da resistência da argamassa.

Oliveira (2012), no seu estudo verificou que a argamassa com a adição de 20% de adição de resíduo de vidro, com granulometria inferior a 0,15 mm, em relação ao volume de agregado, proporcionou um aumento na resistência à compressão, de 91 e 130% aos 28 e 90 dias, respectivamente. O autor justificou este aumento, devido à atividade pozolânica proporcionado pelas partículas do resíduo.

Por outro lado, Ling e Poon (2012) concluíram que, ao substituir 50 e 100%, da areia por resíduo de vidro de tubo catódico, a resistência à compressão da argamassa diminuiu, comparado a referência. Este comportamento foi atribuído pelos autores a ligação mais fraca existente entre a pasta de cimento e os agregados de vidro, comparada

a ligação existente entre a referida pasta e a areia natural. Vale destacar que o resíduo de vidro utilizado por de Ling e Poon (2012) apresentava maior granulometria do que o resíduo utilizado no presente estudo, e no estudo de Oliveira (2012).

4.2.3 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Os resultados obtidos para o ensaio de absorção de água por imersão e índice de vazios estão apresentados na tabela 38. Os resultados individuais constam no apêndice 5.

Tabela 38 Resultados de médias de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas produzidas

Argamassa	A média (%) \pm Sd (%) (CV (%))	IV médio (%) \pm Sd (%) (CV (%))	ME médio (%) \pm Sd (%) (CV (%))
REF	16,15 \pm 0,07 (0,4)	29,34 \pm 0,10 (0,3)	2,57 \pm 0,00 (0,0)
RVG-10	15,36 \pm 0,11 (0,7)	28,33 \pm 0,13 (0,5)	2,57 \pm 0,00 (0,1)
RVG-20	15,28 \pm 0,12 (0,8)	28,11 \pm 0,12 (0,4)	2,57 \pm 0,00 (0,1)
RVG-30	15,02 \pm 0,06 (0,4)	27,85 \pm 0,09 (0,3)	2,57 \pm 0,00 (0,2)

A – Absorção; IV – Índice de vazios; ME – Massa específica real; Sd – Desvio padrão; C.V. – Coeficiente de variação.

A partir dos resultados apresentados, pode-se verificar que a substituição da areia natural pelo RVG acarretou na redução dos valores obtidos para a absorção de água e o índice de vazios das argamassas produzidas.

A influência do teor de RVG nos resultados foi avaliada estatisticamente, através da análise de variância, cujos resultados estão apresentados na tabela 39.

Tabela 39 Análise de Variância para absorção de água por imersão e índice de vazios

Propriedade avaliada	Fator	GDL	MQ	F _{cal}	F _{0,05}	Significância
Absorção de água	Teor de RVG	3	0,712	54,5	4,066	S
	Erro	8	0,013			
Índice de vazios	Teor de RVG	3	1,27	68,5	4,066	S
	Erro	8	0,019			

GDL – Graus de Liberdade; MQ – Média Quadrada; F_{cal} – Valor calculado de F; F_{0,05} – Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S – Significativo; NS – Não Significativo

As avaliações estatísticas demonstraram que a substituição da areia pelo RVG influenciou significativamente no comportamento das argamassas, tanto na absorção de água por imersão quanto no índice de vazios.

Foi realizada também a comparação múltipla de médias, tanto para absorção de água, quanto para o índice de vazios e constatou-se que há diferença significativa entre as médias das argamassas: referência e 10, 20 e 30% de resíduo. Logo, não houve diferença significativa entre as médias das argamassas: 10 e 20% e 20 e 30%.

O comportamento das argamassas quanto à absorção de água por imersão e índice de vazios pode ser observado através das figuras 32 e 33, respectivamente.

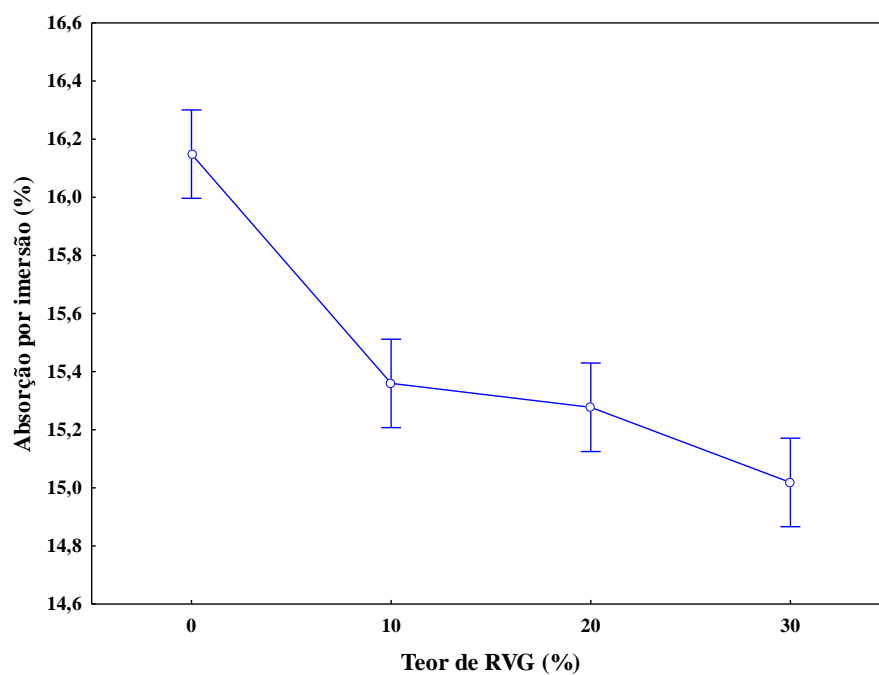


Figura 32 Comportamento das argamassas quanto a absorção de água

A figura 32 apresenta a variação dos resultados médios para a propriedade de absorção de água das argamassas testadas.

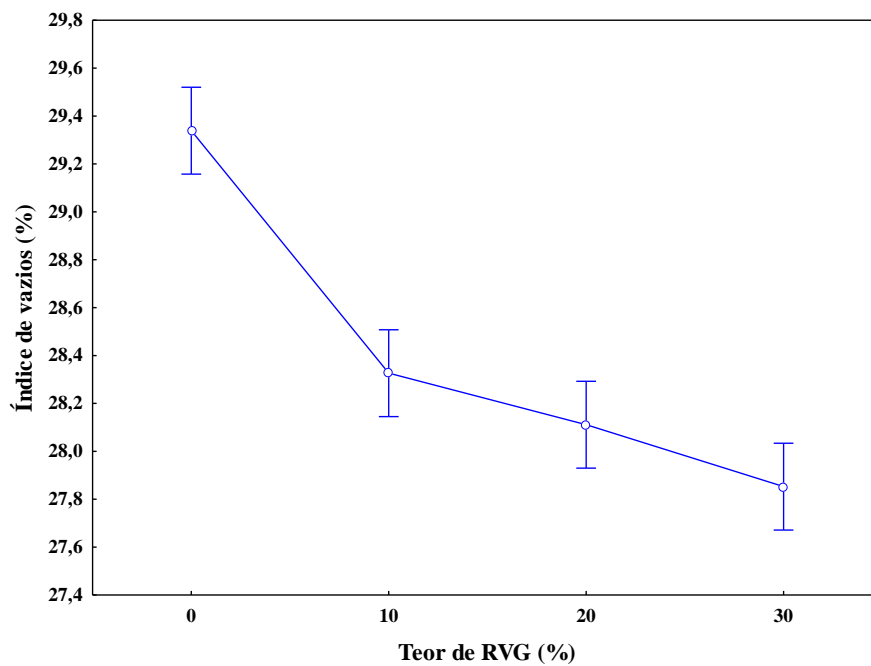


Figura 33 Comportamento das argamassas quanto ao índice e vazios

Na figura 33 apresenta-se a variação dos resultados médios quanto ao índice de vazios das argamassas testadas.

Os resultados relativos de absorção de água e índice de vazios são apresentados nas figuras 34 e 35, respectivamente.

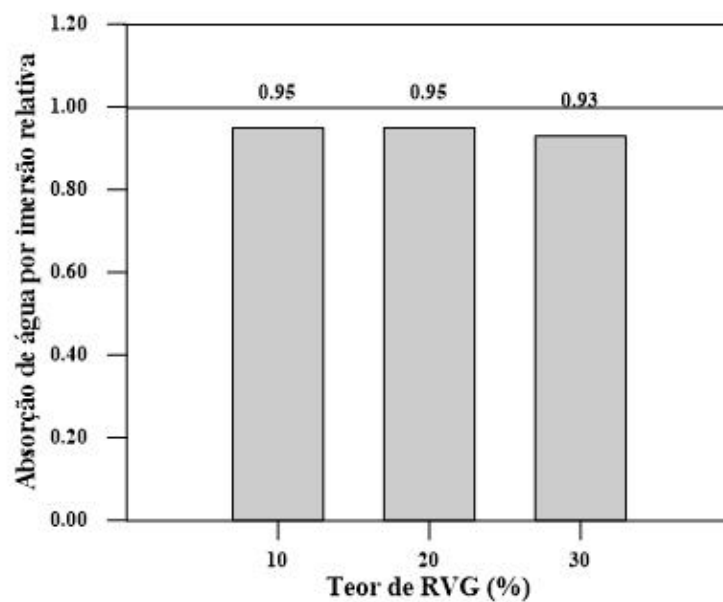


Figura 34 Comportamento das argamassas quanto a absorção de água por imersão

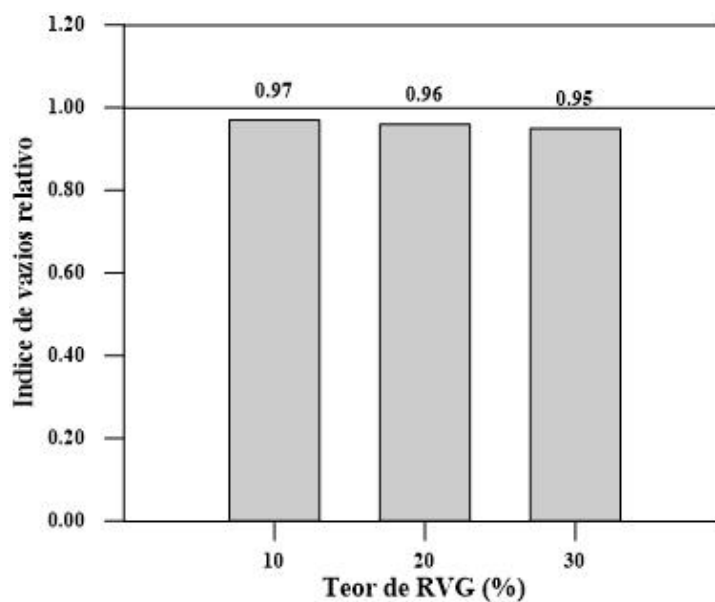


Figura 35 Comportamento das argamassas quanto ao índice de vazios

Verifica-se que houve uma diminuição na absorção de água e no índice de vazios devido à substituição da areia natural pelo RVG. O melhor comportamento foi o

apresentado pela argamassa com 30% de RVG que apresentou uma redução de 7% na absorção de água por imersão e 5% no índice de vazios.

O comportamento das argamassas quanto à absorção e índice de vazios está coerente com os resultados de resistência à compressão: as argamassas com RVG apresentaram maior resistência à compressão. A melhoria na absorção de água e índice de vazios no presente trabalho pode ser atribuída à atividade pozolânica proporcionada pelas partículas finas do RVG, formando mais C-S-H e densificando mais a matriz. Há que se considerar também como fator de melhora a ocorrência de um efeito físico por meio do preenchimento de poros pelas partículas do resíduo.

4.2.4 Expansão devido à reação álcali-sílica

O comportamento das argamassas quanto à expansão pela reação álcali-sílica (RAS) está apresentado na figura 36. Salienta-se que os resultados individuais de expansão por RAS constam no apêndice 6.

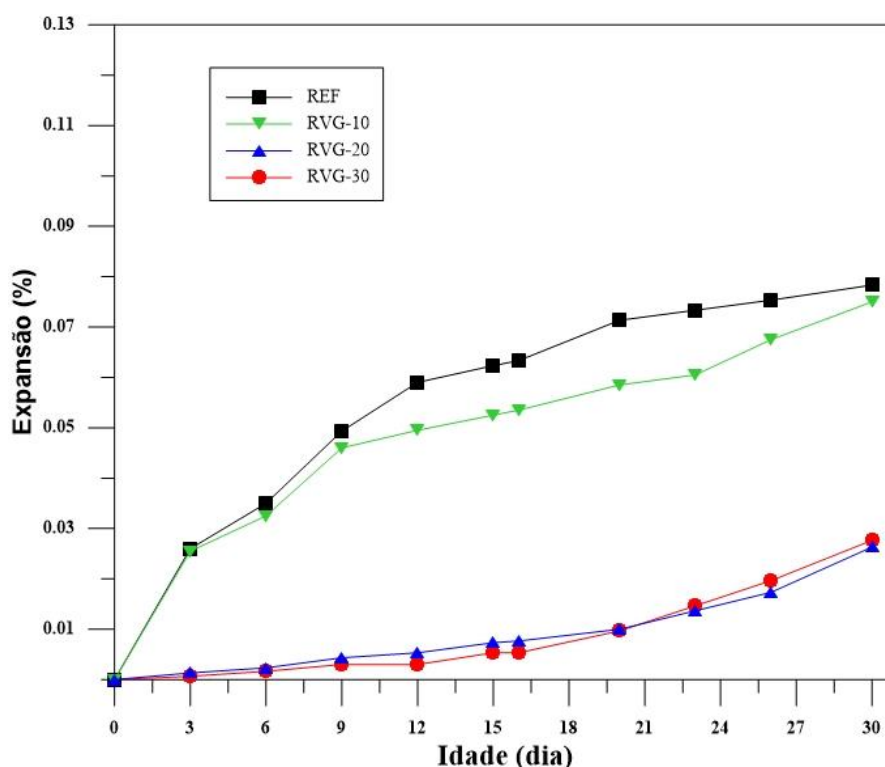


Figura 36 Expansões por RAS das argamassas

As expansões apresentadas pelas argamassas podem ser consideradas pequenas (< 0,08%, aos 30 dias). Para as condições estabelecidas pela NBR 15577-4 (ABNT, 2009),

quando a expansão for inferior a 0,19%, o agregado é considerado inócuo. Vale salientar que as argamassas produzidas no presente estudo, utilizaram apenas 10, 20 e 30% do RVG como agregado, e não 100%, como preconiza a referida norma. Além disso, a granulometria do RVG foi inferior a 0,60 mm. Portanto, bastante inferior à estabelecida pela norma.

Observa-se na figura 40, que as argamassas de referência e com teor de 10% de RVG apresentaram a maior expansão (0,07%, aos 30 dias). As argamassas com teor de 20 e 30% de RVG apresentaram expansões muito inferiores a da argamassa de referência. Este comportamento pode ser justificado pelo fato do tamanho dos grãos do RVG ser muito pequeno. Assim a sílica combina mais rapidamente com o Ca(OH)_2 formando C-S-H, do que com os álcalis.

De modo semelhante, Du e Tan (2013b), ao avaliar os teores de substituição de areia por resíduo de vidro de garrafas nos teores 25, 50, 75 e 100%, concluíram que incorporação do resíduo não apresentou expansão por RAS superior ao limite estabelecido pela norma. Os autores comentam que a expansão não aconteceu devido o tamanho das partículas do resíduo ter sido inferior a 300 μm .

Por outro lado, Ling e Poon (2012) ao avaliar a substituição da areia natural por resíduo de vidro de garrafas, nos teores de 50 e 100%, concluíram o aumento da expansão por RAS com o aumento da porcentagem de substituição. No entanto, o resíduo de vidro utilizado pelos autores apresentava grão de tamanho superior a 4,8 mm.

Relativamente à granulometria do material reativo, Maraghechi *et al.* (2012) ao analisarem o efeito da microfissuração residual das partículas de vidro no potencial da RAS, declarou que a reação que ocorre na superfície da partícula de vidro é a pozolânica e não a RAS, independentemente do tamanho do grão. Segundo o autor, o produto da reação pozolânica na superfície das partículas de vidro não é expansivo, devido à baixa relação SiO_2/CaO . Por outro lado, verificou-se que a expansão devido a RAS resultante de fissuras internas foi mais proeminente, devido a penetração de íons OH^- e uma maior proporção de SiO_2/CaO nas partículas de vidro.

5 CONCLUSÕES

O reaproveitamento do resíduo de vidro de garrafas (RVG) em matrizes cimentícias pode ser uma alternativa para a redução do impacto ambiental proporcionado pela disposição inadequada deste material proveniente, de forma geral, do consumo de bebidas em garrafas de vidro.

Com o objetivo de possibilitar a utilização do RVG na indústria da construção civil, esta pesquisa verificou a influência da substituição parcial da areia natural pelo referido resíduo na produção de argamassa. Com base nos resultados obtidos chegou-se às conclusões conforme apresentadas a seguir. Vale salientar que tais conclusões referem-se aos resultados obtidos a partir das argamassas produzidas estritamente de acordo com os materiais e proporcionamentos específicos, detalhados no programa experimental.

- i. Com relação à caracterização do resíduo de garrafas de cor marrom:
 - a) o resíduo é composto basicamente por óxido de sílica (61%);
 - b) através do difratograma de raios – X, foi possível verificar que o RVG apresenta-se amorfo;
- ii. o RVG apresenta granulometria inferior a 0,6 mm. Cerca de 44% dos grãos correspondeu a uma fração muito fina, cujo diâmetro médio foi de 80 μm .
- iii. Com relação aos resultados dos ensaios das argamassas no estado fresco:
 - a) a substituição do agregado natural pelo RVG não afetou o espalhamento das argamassas;
 - b) a densidade de massa das argamassas apresentou uma pequena diminuição com o incremento do teor de RVG na composição das mesmas. Com um aumento de até 2% para a mistura contendo 30% de RVG;
 - c) a utilização do RVG resultou no aumento do teor de ar incorporado para todos os teores utilizados. Este aumento chegou a 4% para a mistura contendo 30% de RVG;
- iv. Com relação aos resultados dos ensaios das argamassas no estado endurecido:
 - a) as argamassas com RVG apresentaram resistência à tração na flexão, tanto aos 28, quanto aos 90 dias de idade, superior à da argamassa de referência, para todos os

teores estudados. O aumento chegou a cerca de 73% para o teor de substituição de 30 %, aos 90 dias;

- b) a resistência à compressão das argamassas contendo RVG foi maior tanto para a idade de 28 dias quanto para a de 90 dias. O aumento na resistência chegou a 93% para a argamassa com 30% de RVG, aos 90 dias;
- c) a substituição da areia natural pelo RVG proporcionou redução na absorção de água por imersão e no índice de vazios das argamassas. O melhor comportamento foi o apresentado pela argamassa com 30% de RVG, que apresentou uma redução de cerca de 7 e 5%, respectivamente, para as referidas propriedades;
- d) a substituição da areia natural pelo RVG proporcionou redução das expansões por RAS. As argamassas com teores de 20 e 30% apresentaram uma maior redução das expansões. Este resultado comprova que as partículas de vidro de garrafas da cor marrom eram relativamente livres de microfissuras e pode ser considerado um agregado não-reativo a longo prazo.

Com base nos resultados concluiu-se que, para as condições que foram estabelecidas neste estudo, é possível utilizar até 30% de RVG em substituição ao agregado natural.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir da pesquisa realizada sugerem-se os seguintes tópicos para estudo:

- Verificar a influência da utilização de maiores teores de RVG em substituição à areia, na produção argamassas.
- Avaliar a influência da utilização de RVG em substituição à areia em outros parâmetros de durabilidade, a exemplo de ataque por sulfatos e cloreto e carbonatação.
- Verificar a influência da utilização de RVG com granulometria inferior a 0,15 mm na produção de argamassas e concretos.
- Avaliar a influência da utilização de RVG na produção de concretos.
- Utilizar resíduos de outros tipos de vidro, a exemplo de para-brisa, lâmpadas comuns e fluorescentes (descontaminadas) e de construção e demolição.
- Avaliar o comportamento do resíduo em concretos de resistência convencional e de alto desempenho.

6 REFERÊNCIAS

AFSHINNIA, K.; POURSAEE, A. The potential of ground clay brick to mitigate Alkali–Silica Reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 164-170, 2015.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE (APA). **Ambiente Portugal Ambição para o Futuro**. Disponível em <https://www.apambiente.pt/>, acesso em 15 de novembro de 2016.

ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A.; ABOSHAMA, A. Y. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v.124, p. 866-877, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (ASTM). **ASTM C 1260**: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method). In: Anual Book of ASTM, 2007.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo-cálcico na produção de concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2012, 163f. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2016.pdf>, acesso em 11 de fevereiro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Anuário ABIVIDRO 2008**. Disponível em: <http://www.abividro.org.br>, acesso em 23 de outubro de 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11579**: Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μ m (nº 200), Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653**: Materiais Pozolânicos – Requisitos, Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14656:** Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15577-4:** Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6467:** Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9202:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura por meio da peneira 0,044 mm (nº 325) - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecido – determinação da absorção de água por imersão, Índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 76:** Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine), Rio de Janeiro, 1996.

BARDINI, I. S.; MARCHIORO, T. B. **Um estudo exploratório de uso de vidro reciclado como agregado de concreto.** 2007, 42f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Sul de Santa Catarina, Santa Catarina, 2007.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**, 5. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002, 589p.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. Alkali fixation of C–S–H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 8, p. 1049-1054, 2012a.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. The influence of aluminium on the dissolution of amorphous silica and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v.42, n. 12, p. 1645-1649, 2012b.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO RAMO QUÍMICO DA CUT (CNQ-CUT). **Panorama Setor de Vidro 2015.** Disponível em: <http://cnq.org.br/system/uploads/publication/b2a03b701c902f59b717ce1e7395502e/file/panorama-vidros.pdf>, acesso em 23 de outubro de 2017.

CONSÓRCIO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM (CEMPRE). Disponível em: <http://www.cempre.org.br>, acesso em 10 de outubro de 2016.

CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENERO, A. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 197-201, 2005.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of “alkali-aggregate” reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 11, n. 1, p. 1-9, 1981a.

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. Some observations on the rapid chemical test for potentially reactive aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 11, n. 2, p. 191-196, 1981b.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 5, n. 4, p. 329-345, 1975.

DU, H.; TAN, K.H. Use of waste glass as sand in mortar: Part I – Fresh, mechanical and durability properties. **Cement and Concrete Composites**, v.35, n. 1, p. 109-117, 2013a.

DU, H.; TAN, K.H. Use of waste glass as sand in mortar: Part II – Alkali-silica reaction and mitigation methods. **Cement and Concrete Composites**, v.35, n. 1, p. 118-126, 2013b.

EMHART GLASS. **Glass forming process**. Disponível em: <http://www.bucheremhartglass.com>, acesso em 10 de abril de 2017.

FENG, X.; THOMAS, M. D. A.; BREMNER, T. W.; BALCOM, B. J.; FOLLIARD, K. J. Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 9, p. 1789–1796, 2005.

GLASSER, F. P. Chemistry of the alkali-aggregate reaction. In: SWAMY, R. N. **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Glasgow/London: Blackie/New York: Van Nostrand Reinhold, p. 30-53, 1992.

GUIA DO VIDRO. **Portal Guia do Vidro**. Disponível em <http://www.guiadovidro.com.br/>, acesso em 07 de novembro de 2016.

GUILLANTE, P.; VALENTINI, P.; KULAKOWSKI, M. P.; AGUIDA, G. A. Efeito sinérgico da cinza de casca de arroz e do resíduo de cerâmica vermelha na mitigação da RAA. In: ENCONTRO NACIONAL DE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO, v. 5, 2017. **Anais...** Fortaleza, 2017.

ISMAIL, Z. Z.; AL-HASHMI, E. A. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management**, v.29, n. 2, p. 655-659, 2009.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000, 113f. Tese de Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KAMALI, M.; GHAREMANINEZHAD, A. Effect of glass powders on the mechanical and durability properties of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v.98, p. 407-416, 2015.

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL (LNEC). **E-462**: Resistência dos cimentos ao ataque por sulfatos. Lisboa, 2004.

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

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação**, 1. ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2003. 211p.

MARAGHECHI, H.; SHAFATIAN, S. M. H.; FISCHER, G.; RAJABIPOUR, F. The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 41-47, 2012.

MATA, T. M. C. P. **Comparação de processos de reutilização/reciclagem usando a metodologia de análise de ciclo-de-vida**. 2010, 189f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2010.

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

MEYER, C. The greening of the concrete industry. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, p. 601-605, 2009.

MME - Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não Metálicos**. Brasília, 2011.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Urbana). 2007, 166f. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NAIK, T. R.; MORICONE, G. Environmental-friendly durable concrete made with recycled materials for sustainable concrete construction. In: **International Symposium on Sustainable Development of Cement, Concrete and Concrete Structures**, Toronto, p. 485-505, 2005.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 5 ed. São Paulo, Bookman, 2015. 912p.

OLIVEIRA, B. R. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro - Efeito de filler e pozolânico**. 2012, 282f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012.

PADE, C.; GUIMARAES, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100 years perspective. **Cement and Concrete Research**, v.37, n. 9, p. 1348–1356, 2007.

PARGHI, A.; ALAM, M. S. Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR). **Construction and Building Materials**, v.104, p. 34-43, 2016.

PARK, S. B.; LEE, B. C. Studies on expansion properties in mortar containing waste glass and fibers. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 7, p. 1145-1152, 2004.

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

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

PRADO, M. R. **Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e pet utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil**. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos). 2007, 188f. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RAMLOCHAN, T.; THOMAS, M.D.A.; HOOTON, R.D. The effect of pozzolans and slag on the expansion of mortars cured at elevated temperature: part II: microstructural

and microchemical investigations. **Cement and Concrete Research**, v.34, n.8, p.1341–1356, 2004.

ROSA, S. E. S.; COSENSA, J. P.; BARROSO, D. V. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. **BNDS Setorial**, Rio de Janeiro, n. 26, p. 101-138, 2007.

SAUER, A. S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2013, 180f. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

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

SHEHATA, M. H.; THOMAS, M. D. A. The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v.30, n. 7, p. 1063–1072, 2000.

SHI, C.; ZHENG, K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 2, p. 234–247, 2007.

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; SANTOS, J. C. P. dos. Vidros na Construção Civil. In: Isaia, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, v. 1, p. 655-691, 2007.

SIMÕES, L. J. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). 2013, 142f. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

TAHA, B.; NOUNU, G. Utilizing waste recycled glass as sand/cement replacement in concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, p. 709-721, 2010.

TREMBLAY, C.; BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; THOMAS, M. D.; FOLLIARD, K. J. Experimental investigation of the mechanisms by which LiNO_3 is effective against ASR. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 4, p. 583–597, 2010.

TURRIZIANI, R. Internal degradation of concrete: alkali-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion. In: International Congress on the Chemistry of Cement, v. 1, 1986. **Anais...** Rio de Janeiro, 1986.

WANG, H. The effect of the proportion of thin film transistor-liquid crystal display (TFT-LCD) optical waste glass as a partial substitute for cement in cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 2, p. 791-797, 2011.

ZHAO, H.; POON, C. S. A comparative study on the properties of the mortar with the cathode ray tube funnel glass sand at different treatment methods. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 900-909 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE DENSIDADE DE MASSA DAS ARGAMASSAS

Tabela 40 Resultados individuais de densidade de massa das argamassas

Argamassa	Densidade de massa
REF	1757
	1759
RVG-10	1744
	1750
RVG-20	1735
	1736
RVG-30	1725
	1728

APÊNDICE 2 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE TEOR DE AR INCORPORADO DAS ARGAMASSAS

Tabela 41 Resultados individuais de teor de ar incorporado das argamassas

Argamassa	Teor de ar incorporado (%)
REF	20,4
	20,3
RVG-10	20,8
	20,5
RVG-20	21,0
	20,9
RVG-30	21,3
	21,1

APÊNDICE 3 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS ARGAMASSAS

Tabela 42 Resultados individuais de resistência à tração na flexão das argamassas

Argamassa	Resistência à tração na flexão (MPa)	
	28 dias	90 dias
REF	3,84	4,89
	3,82	5,00
	3,85	5,00
RVG-10	4,05	6,80
	4,10	6,74
	4,08	6,46
RVG-20	4,65	8,20
	4,35	8,29
	4,58	8,20
RVG-30	5,12	8,58
	5,33	8,43
	5,77	8,77

APÊNDICE 4 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DAS ARGAMASSAS

Tabela 43 Resultados individuais de resistência à compressão das argamassas

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)	
	28 dias	90 dias
REF	6,78	8,86
	6,85	8,69
	6,96	8,61
	6,86	8,45
	6,96	9,04
	6,86	9,06
RVG-10	8,08	12,50
	8,20	11,57
	8,88	12,15
	8,39	12,49
	8,85	13,25*
	8,16	13,08
RVG-20	9,91	15,94
	9,93	16,38
	8,97	15,68
	9,93	16,11
	9,72	16,47
	10,27	16,29
RVG-30	11,85	17,04
	12,55*	16,92
	10,81	17,03
	11,71	16,60
	11,21	17,36
	11,27	16,66

* Valor discrepante não considerado, conforme NBR 13279 (ABNT, 2005)

APÊNDICE 5 – RESULTADOS INDIVIDUAIS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS DAS ARGAMASSAS

Tabela 44 Resultados individuais de absorção por imersão e índice de vazios das argamassas

Argamassa	At (%)	Iv (%)
REF	16,16	29,35
	16,23	29,46
	16,06	29,21
RVG-10	15,49	28,48
	15,37	28,33
	15,22	28,16
RVG-20	15,12	27,96
	15,30	28,26
	15,41	28,11
RVG-30	14,97	27,83
	15,10	27,97
	14,99	27,76

APÊNDICE 6 – RESULTADOS DAS EXPANSÕES POR REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA DAS ARGAMASSAS

Tabela 45 Resultados das expansões por RAS das argamassas

Idade (dias)	Expansão (%)			
	REF	RVG-10	RVG-20	RVG-30
3	0,026	0,025	0,001	0,001
6	0,035	0,032	0,002	0,002
9	0,049	0,046	0,004	0,003
12	0,059	0,050	0,005	0,003
15	0,062	0,052	0,007	0,005
16	0,063	0,054	0,008	0,005
20	0,071	0,059	0,010	0,010
23	0,073	0,061	0,014	0,015
26	0,075	0,067	0,017	0,020
30	0,078	0,075	0,026	0,028