

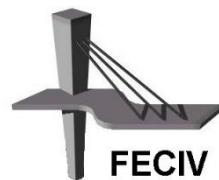


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

**ESTUDO DE RESÍDUO DA LAPIDAÇÃO DE VIDRO
PARA INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSAS DE
CIMENTO PORTLAND**

Anderson Osvaldo Ribeiro

UBERLÂNDIA, 04 de setembro de 2015



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



Anderson Osvaldo Ribeiro

**ESTUDO DE RESÍDUO DA LAPIDAÇÃO DE VIDRO PARA
INCORPORAÇÃO EM ARGAMASSAS DE CIMENTO
PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. João Fernando Dias

Uberlândia, 04 de setembro de 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R484e Ribeiro, Anderson Osvaldo, 1975-
2015 Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em
argamassas de cimento portland / Anderson Osvaldo Ribeiro. - 2015.
86 f. : il.

Orientador: João Fernando Dias.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Argamassa - Teses. 3. Cimento
portland - Teses. 4. Construção civil - Refugo de vidro - Teses. I. Dias,
João Fernando. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 149/2015

CANDIDATO: Anderson Osvaldo Ribeiro

Nº. Matrícula: 11312ECV002

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Fernando Dias

TÍTULO: "Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

DATA DA DEFESA: 04 de setembro de 2015

LOCAL: Sala de webconferência 03, bloco 5M.

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 9:45 h - 12:10 h

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

APROVADO

REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. João Fernando Dias – FECIV/UFU**

Leonardo F. R. Miranda

Membro externo: **Prof. Dr. Leonardo Fagundes Rosembach Miranda – CP/UFPR**

Membro interno: **Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU**

Uberlândia, 04 de SETEMBRO de 2015

DEDICATÓRIA

Dedico essa dissertação:

À minha esposa Flávia, por toda sua dedicação e amor a mim, muito maiores do que minhas retribuições, pela extrema paciência e compreensão com minhas ausências e impaciências, principalmente durante o período de dedicação ao Mestrado. Seu apoio incansável possibilitou todas as conquistas que tive em minha vida adulta. Tenho certeza que os obstáculos superados em minha vida não seriam possíveis sem que você estivesse ao meu lado.

Aos meus pais... minha mãe pelo incentivo ao estudo em minha adolescência, ao meu pai por seu exemplo de honestidade e simplicidade, muito importantes para minha formação de homem. Por terem possibilitado a mim e ao meu irmão, na simplicidade do trabalho de uma oficina mecânica e de uma máquina de costura, a oportunidade de acesso ao estudo que os senhores não puderam ter.

In memorian e com imensa saudade, à Maria Aparecida Paina, por todo carinho, respeito, amor e dedicação incondicionais a mim e à Flávia. Pelo seu exemplo de desprendimento e pureza de coração. Também in memorian e com muitas saudades, ao meu primo Juliano Ribeiro, por todas as travessuras e sorrisos que compartilhamos desde a infância, boas lembranças que levarei eternamente comigo. Como seria bom ganhar um abraço de vocês nesse momento!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por minha saúde, força e fé que permitiram a caminhada até aqui.

Agradeço ao meu orientador, prof. Dr. João Fernando Dias, pela disposição em atender-me em todos os momentos em que suscitaron dúvidas no decorrer desse estudo, pelo respeito à liberdade de minhas ideias, pela postura profissional, cordial e incentivadora com a qual sempre me tratou e, principalmente, por toda a confiança depositada em mim para o desenvolvimento desse estudo.

À CAPES, pelo incentivo à pesquisa por meio da bolsa recebida em parte do tempo de realização do Mestrado.

Ao engenheiro Fábio Braga e à empresa VITRAL pela disponibilidade em ceder o resíduo usado nesse estudo.

Ao prof. Dr. Turíbio José da Silva, pelas sugestões durante o exame de qualificação, pela colaboração na confecção e análise dos traços de argamassa e pela disposição em esclarecer dúvidas sempre que eu lhe procurei.

À prof. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta, por sua cordialidade, pelas sugestões apresentadas durante o exame de qualificação, pela colaboração na realização dos ensaios de flexão, gentilmente cedendo o equipamento e ainda, pela disposição em atender-me para esclarecer dúvidas durante o trabalho de pesquisa.

A todos os demais professores da graduação e do programa de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da UFU, pelo aprendizado e troca de experiências que, muitas vezes, ultrapassavam o limite das salas de aulas.

Ao prof. Dr. Carlos Ataíde e à doutoranda Isabele Bicalho, do Laboratório de Separação Sólido-Fluido do curso de Engenharia Química da UFU, pela realização dos ensaios de composição granulométrica do resíduo.

À técnica do Laboratório de Estruturas da FECIV, Cristiane Pires, por sua simpatia, cordialidade e extrema disposição em colaborar na realização dos experimentos. Muitos dos ensaios desse estudo não seriam possíveis sem sua colaboração.

Ao técnico Wanderly Geraldo da Silva, do Laboratório de Materiais de Construção Civil, pela troca de experiências e auxílio na realização de diversos experimentos. À técnica Aline Martins Pinheiro, do Laboratório de Saneamento, pelo preparo de soluções usadas no ensaio de expansão.

À pesquisadora Júlia Graciele Vieira pela realização do ensaio Chapelle de atividade pozolânica do resíduo.

Aos funcionários da secretaria do programa de pós-graduação, Sueli, Marianny, Maria Nazareth e Rafael Monteiro, pela cordialidade sempre presente no atendimento e presteza para dar encaminhamento às solicitações.

Aos coordenadores do programa de pós-graduação, prof. Dr. Carlos Eugênio Pereira e prof. Dr. Márcio Ricardo Salla, pela cordialidade e disposição em atender às minhas solicitações sempre que possível.

Ao prof. Dr. Dogmar Antonio de Souza Júnior, pela amizade desde os tempos de graduação, pelo incentivo ao meu ingresso no Mestrado e enorme colaboração no início de meu trabalho docente no ensino superior.

À minha amiga-irmã, Cléo Geovanini, pela acolhida em sua casa, pelas palavras de incentivo nos momentos de desânimo, por seu ombro amigo, pela disposição em aconselhar-me e escutar-me sempre, pelo amor de amigo, verdadeiro e sincero que desfrutamos nesses anos de convívio.

Aos mestrandos, com os quais dividi angústias, anseios e alegrias, seja no curso das disciplinas ou no desenvolvimento da pesquisa. Em especial aos colegas Goubyan Borges, Arthur, Thiago Homena, Monise Ramos, Maria Claudia, Antonio Sarkis, Gercindo Ferreira, Eduardo Hubaide e Blaine Alves. Pelos momentos de boa convivência nas salas de aulas, laboratórios, sala de estudos da pós-graduação, ou até mesmo fora dos muros da universidade.

Aos colegas, mestrandos ou doutorandos, companheiros das muitas viagens Uberaba/Uberlândia desde o início do mestrado, Antonio Sarkis, Deusmaque, Bruno Teixeira, Bruno Canelhas, Cecília Marega, Luís César, Nilce, Larissa Zanini e Pedrita. Esta conquista pode ser descrita pelos milhares de quilômetros rodados nas viagens. A companhia e amizade de vocês foi sempre motivadora nos momentos de cansaço.

Aos ex-colegas de trabalho na UNIUBE, gestores e diretores dos cursos de engenharia, professores Luís César, Marcos Leopoldo, José Roberto, Clidenor Araújo e Daniela Orbolato, pela disponibilidade em colaborar na organização de meus horários de aula, permitindo o curso das disciplinas do Mestrado.

Aos coordenadores de curso, coordenadores de ensino e diretores do IFTM – Campus Avançado Uberaba Parque Tecnológico, professores Marcelo Ponciano, Marcelo Barreiro, Daniela Orbolato, Eduardo Silvestre, Frederico Gomes, Lívia Zanier e José Ricardo, pela adequação de meu horário de trabalho, permitindo o desenvolvimento desse estudo.

A todas as pessoas que, de longe ou de perto, acompanharam minha caminhada no Mestrado, ou ainda, desde os tempos de graduação e que sempre torceram pelo meu sucesso. O amor e carinho de todos vocês foram combustíveis fundamentais para mim.

“O homem é a mais insana das espécies. Adora um Deus invisível e mata a Natureza visível... sem perceber que a Natureza que ele mata é esse Deus invisível que ele adora”

Hubert Reeves

Ribeiro, A. O. Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland. Dissertação de Mestrado. 86p. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

RESUMO

A indústria da construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais e atualmente se estudam formas de diminuir ou racionalizar o consumo de insumos para produção dos materiais e componentes de construção. A incorporação de alguns resíduos sólidos industriais tem se mostrado uma alternativa interessante para a produção de concretos, argamassas e blocos de concreto, dentre outras aplicações com cimento Portland. O objetivo desse estudo foi analisar os efeitos da incorporação do resíduo da lapidação do vidro *float* (RLV) em argamassas de cimento Portland e areia natural. O RLV foi usado como material cimentício suplementar, com substituições à massa de cimento nos percentuais de 5%, 10%, 15%, 20% e 25%. Foram produzidas duas séries de argamassas, a primeira com relação água-aglomerante constante e outra com relação água-cimento constante. O estudo foi desenvolvido por meio de comparações entre as características de uma argamassa de referência, sem adição do RLV, e as propriedades das argamassas produzidas com diferentes percentuais de RLV. As argamassas foram estudadas no estado fresco e no estado endurecido, com análise das seguintes propriedades: densidade no estado fresco; índice de consistência; retenção de água; teor de ar incorporado; resistência à compressão; resistência a tração na flexão; índice de vazios; módulo de elasticidade dinâmico, massa específica no estado endurecido e reatividade álcali-sílica. Nas argamassas com relação água-cimento constante o uso do RLV provocou diminuição significativa no índice de consistência, com variação inversamente proporcional ao percentual de RLV na mistura. As outras propriedades no estado fresco apresentaram pequenas variações para as duas séries de argamassas. Nas argamassas endurecidas a substituição do cimento pelo RLV produziu diminuição na resistência à compressão nas idades de 7 e 14 dias, mas nas idades de 28, 63 e 91 dias de cura as argamassas com maior percentual de resíduo mostraram aumento significativo em suas resistências, ainda que apresentassem menor consumo de cimento. O ensaio de expansão devido à reação álcali-sílica, mostrou que a incorporação do RLV não produziu efeito deletério nas argamassas devido às expansões e possibilitou, em alguns casos, até mesmo a redução dessas expansões. Para as características avaliadas, o uso do resíduo da lapidação do vidro como substituto parcial do cimento se mostrou viável com manutenção, ou ainda, melhora em algumas propriedades das argamassas com RLV.

Palavras-chave: resíduo de vidro; argamassas; cimento Portland

Ribeiro. A. O. Study of the residue of the polishing glass for incorporation in Portland cement mortars. Master dissertation. 86p. Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2015

ABSTRACT

The building industry is a great consumer of natural resources, and it is currently being investigated ways to reduce or rationalize the consumption of natural products for the production of materials and building components. The incorporation of some solid industrial residues has been shown as an interesting alternative to produce concretes, mortars e concrete blocks, among other applicability of the Portland cement. This study aimed was to analyze the effect of incorporation of the polishing float glass (PGF) in mortars of Portland cement and natural sand. The PGF was used as supplementary material to the cement, replacing the cement mass in the percentages of 5%, 10%, 15%, 20% and 25%. Two series of mortars were produced, the first with water-binder ratio constant and another with constant water-cement ratio. In the development of the research comparisons were made between the characteristics of a reference mortar without addition of the PGF, and properties of mortars produced with different percentages of PGF. The mortars were studied in fresh and hardened state, with analysis of the following characteristics: density in the fresh state; consistency index; water retention; incorporated air content; compressive strength; tensile strength in bending; void ratio; dynamic modulus of elasticity; density in the hardened state and alkali-silica reactivity. In mortars with constant relation water-cement, the use of PGF caused a significant decrease in the consistency index, variation inversely proportional to the percentage of PGF in the mixture. Other properties in the fresh state showed small variations for the two mortars series. In the hardened mortar cement replacement by PGF produced decrease in compressive strength at ages of 7 and 14 days. However, even with reduced consumption of cement, mortar with a higher residue percentage showed a significant increase in their resistance for ages 28, 63 and 91 days of curing. The expansion test as a result of alkali-silica reaction, showed that the incorporation of PGF produces no deleterious effects due to the expansions in the composites studied and, in some cases, even promotes reduction of these expansions. The use of the residue of polishing glass as a partial cement replacement proved feasible to maintain, or even by improving some properties of mortars with PGF.

Key words: glass residue; mortars; Portland cement

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SIGLAS

RLV – Resíduo de lapidação do vidro

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira de Referência

NM – Norma Mercosul

FECIV – Faculdade de Engenharia Civil

UFU – Universidade Federal de Uberlândia

ABREVIATURAS

a/a – relação água-aglomerante

a/c – relação água-cimento

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (A) <i>Bags</i> de armazenamento do resíduo; (b) Aspecto do material úmido depositado no <i>bag</i>	30
Figura 2 - Processo de secagem, em estufa, das amostras do resíduo.....	32
Figura 3 - Corpos de prova submersos em água para cura no interior da estufa.	34
Figura 4 - Prensa utilizada para ensaio de tração na flexão.....	37
Figura 5 – Prisma de argamassa sobre a base de apoio no ensaio de flexão	37
Figura 6 - Tanque para cura submersa dos corpos de prova.....	38
Figura 7 - (A) Mistura dos materiais na argamassadeira; (B) Recipiente para homogeneização da mistura de cimento e RLV	38
Figura 8 - (A) Tronco de cone de agregado miúdo; (B) Tronco de agregado pós quarteamento da amostra	40
Figura 9 - (A) Barras de argamassa para ensaio de expansão; (B) Aspecto das barras de argamassas pós desforma	41
Figura 10 - Barras de argamassa acondicionadas em estufa parra ensaio de expansão.....	41
Figura 11 - Equipamento usado para medida das expansões nas barras de argamassa.....	42
Figura 12 - (A) Detalhe de corpo de prova em acessório para ensaio à compressão; (B) Corpos de prova capeados com enxofre.....	43
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo	44
Figura 14 – Amostra de resíduo armazenado em bandejas para secagem	45
Figura 15 - (A) Aspecto do resíduo após secagem e fracionamento inicial; (B) Resíduo seco e destorrado	45
Figura 16 - Curva granulométrica do RLV.....	46
Figura 17 – Índice de consistência das argamassas no estado fresco	52

Figura 18 - Aspecto da argamassa 2D no ensaio do índice de consistência	53
Figura 19 – Teor de ar incorporado para as argamassas.....	55
Figura 20 - Retenção de água nas argamassas.....	56
Figura 21 - Percentual de vazios e absorção das argamassas aos 28 dias.....	60
Figura 22 - Valores de tensão à tração na flexão para argamassas com relação água-cimento constante	62
Figura 23 - Resistência à compressão aos 7 e 14 dias das argamassas com relação água-aglomerante constante	65
Figura 24 - Evolução das resistências a compressão das argamassas A, C e E entre as idades de 7 dias e 63 dias	67
Figura 25 - Resistência à compressão para argamassas com a/c constante.....	68
Figura 26 – Comparativo de resistências à compressão para as duas séries de argamassas na idade de 28 dias.....	69
Figura 27 – Comparativo de resistências à compressão para as duas séries de argamassas, na idade de 63 dias.....	70
Figura 28 – Relação entre os valores do módulo de elasticidade e da resistência a compressão.....	73
Figura 29 - Expansões para as argamassas com relação água-aglomerante constante.....	75
Figura 30 - Expansões para as argamassas com relação água-cimento constante	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Normas de referência para ensaios no estado endurecido	36
Quadro 2 - Ensaios realizados e respectivas idades dos corpos de prova	37
Quadro 3 - Normas de referência para ensaios no estado fresco	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do vidro	24
Tabela 2 – Primeira série de argamassas e percentual de resíduo utilizado	35
Tabela 3 – Segunda série de argamassas e percentual de resíduo utilizado	36
Tabela 4 - Número de ensaios realizados para cada propriedade das argamassas	43
Tabela 5 - Atividade pozolânica do resíduo com o cimento Portland	48
Tabela 6 - Argamassas estudadas com relação água/aglomerante constante	50
Tabela 7 - Traços de argamassa para relação água/cimento constante	51
Tabela 8 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco	51
Tabela 9 – Valores dos consumos de cimento das argamassas.....	58
Tabela 10 - Absorção e índice de vazios para argamassas com a/c constante ...	58
Tabela 11 - Absorção e índice de vazios nas argamassas com a/a constante	59
Tabela 12 – Massas específicas das argamassas no estado endurecido.....	61
Tabela 13 – Ruptura por tração na flexão para argamassas com a/a constante .	64
Tabela 14 – Ruptura à compressão para argamassas com a/a constante	66
Tabela 15 – Evolução da resistência à compressão para argamassas com a/a constante.....	68
Tabela 16 – Valores de a/a e a/c para as argamassas	71
Tabela 17 – Módulo de elasticidade dinâmico para as duas séries de argamassas	72

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	18
1.1 A importância do tema e justificativa do estudo.....	18
1.2 Objetivos.....	20
1.3 Organização do trabalho	21
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	22
2.1 Resíduos sólidos e seu uso na construção civil	22
2.2 O resíduo de vidro e sua incorporação em concretos e argamassas	24
2.3 A reatividade álcali-sílica	26
Capítulo 3 – Materiais e Métodos.....	29
3.1 O resíduo da lapidação do vidro.....	29
3.1.1 Geração do resíduo.....	29
3.1.2 Coleta e caracterização do resíduo	31
3.1.3 Atividade pozolânica do resíduo.....	33
3.2 Avaliação das argamassas com RLV	34
3.3 Caracterização do agregado miúdo e do cimento	39
3.4 Avaliação da reatividade álcali-sílica	40
3.5 Adequações, quantidade de ensaios e análise estatística dos dados.....	42
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	44
4.1 Cimento e agregado miúdo	44
4.2 Caracterização física do resíduo	45
4.3 Atividade pozolânica do resíduo.....	47
4.4 Estudo comparativo das argamassas.....	50
4.4.1 Traços das argamassas	50
4.4.2 Índice de consistência e densidade de massa no estado fresco.....	51
4.4.3 Teor de ar incorporado e retenção de água	55

4.4.4	Consumo de cimento	57
4.4.5	Índice de vazios e absorção no estado endurecido	58
4.4.6	Massa específica no estado endurecido.....	61
4.4.7	Resistência à tração na flexão	62
4.4.8	Resistência à compressão	65
4.4.9	Módulo de elasticidade dinâmico.....	72
4.4.10	Reatividade álcali-sílica	74
	Capítulo 5 – Conclusões	78
	Referências	80

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 A importância do tema e justificativa do estudo

A Engenharia Civil tem atuado de forma direta como modificadora do ambiente em que vivemos, adequando esse ambiente às necessidades humanas. Nesse processo de adequação ocorre o consumo de recursos naturais, alguns deles renováveis e outros não.

Segundo Rocha e Cheriaf (2003) a indústria da construção civil, atualmente, reconhece a necessidade de se desenvolverem materiais e técnicas construtivas que minimizem os danos provocados ao homem e ao meio ambiente.

Mehta e Monteiro (2008) salientam que, apesar do impacto ambiental que a indústria da construção provoca, ela apresenta um grande potencial para consumir os resíduos gerados por ela mesma ou por outras indústrias.

Diversos trabalhos têm estudado a incorporação de resíduos em materiais de construção, na produção de novos compósitos ou substituição de determinados materiais, por exemplo, o uso de agregados reciclados em concretos e/ou argamassas. A incorporação desses resíduos tem intuito de diminuir o consumo das matérias-primas ou promover melhorias nos compósitos produzidos.

A construção civil é o maior consumidor de matérias-primas naturais não-renováveis. O emprego de resíduos sólidos neste setor tem representado economia de recursos naturais, de energia e tem trazido benefícios ambientais, contribuindo para a política de desenvolvimento sustentável. (LINTZ *et al*, 2008)

No contexto de reaproveitamento e/ou reutilização de materiais há estudos que investigam a incorporação do resíduo de vidro em concretos e/ou argamassas, em

substituição aos agregados graúdos e/ou miúdo, ou ainda, como substituição parcial do cimento Portland.

Topçu e Canbaz (2004) estudaram o emprego do resíduo de vidro, gerado a partir de garrafas moídas, em concretos com diferentes percentuais de substituição do agregado graúdo pelo vidro. Os autores verificaram que o acréscimo do percentual de resíduo promovia incrementos na trabalhabilidade, devido à menor absorção de água do agregado de vidro, mas também promovia diminuição na resistência mecânica e aumento na expansão devido à reação álcali-sílica.

O consumo mundial de concreto em 2008 era estimado em 40 bilhões de toneladas métricas ao ano, segundo Mehta e Monteiro (2008). Consequentemente também há um elevado consumo de cimento. Segundo dados da ABCP (2013), entre 2005 e 2012 o consumo de cimento no Brasil avançou 80% e projeções para o ano de 2017 indicam que a produção de concreto em centrais dosadoras atinja 72,3 milhões de m³. O consumo de cimento no Brasil no ano de 2013 atingiu 71 milhões de toneladas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO, 2013)

Costa e Silva *et al* (2011) analisaram os efeitos da substituição parcial do agregado miúdo natural (areia) por vidro moído em concretos. Os autores verificaram um decréscimo nos valores de resistência mecânica nos concretos à medida que se aumentava o percentual de substituição da areia pelo vidro. Os autores não realizaram análises relativas à durabilidade devido aos efeitos da reação álcali-sílica.

A incorporação do resíduo de vidro em pó pode ainda substituir parcialmente o cimento Portland, como mostram os estudos de Shayan e Xu (2006), Matos e Sousa-Coutinho (2012) e Ramos *et al* (2013). A substituição do cimento pelo pó de vidro finamente moído, até determinados limites de substituição, coloca-se como uma alternativa viável. Existem ainda outros benefícios estudados por esses e outros autores, como a ação do pó de vidro como supressor da reação álcali-sílica para agregados potencialmente reativos.

O vidro é um material que pode ser reciclado diversas vezes sem modificarem suas propriedades, com pequena perda de material no processo (ABVIDRO). Ainda que o resíduo de vidro possa ser, quando comparado a outros materiais, facilmente reincorporado no processo de produção de novas peças de vidro, o estudo de sua incorporação em compósitos de cimento Portland se coloca como uma boa alternativa de reuso desse material, com possibilidades de redução nos custos dos concretos produzidos, diminuição no consumo de cimento e preservação das jazidas das matérias-primas do cimento.

O estudo da incorporação do resíduo da lapidação de placas de vidro em argamassas de cimento Portland se justifica então pela possibilidade de redução no consumo de cimento e consequente preservação de jazidas de matérias-primas, ou ainda, devido aos benefícios que a incorporação desse resíduo pode promover nos compostos produzidos. Ressaltasse ainda como justificativa do estudo a possibilidade de se agregar valor ao resíduo de lapidação do vidro, uma vez que se ele for gerado distante das indústrias produtoras de vidro sua reciclagem para produção de novas peças envolverá custos de transporte, e seu uso como material suplementar ao cimento Portland na região onde ele fosse gerado, se tecnicamente viável, poderia ser uma alternativa economicamente mais vantajosa.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do estudo é verificar a possibilidade técnica de utilização do resíduo da lapidação de placas de vidro, por meio da incorporação desse resíduo na produção de argamassas de cimento Portland.

Os objetivos específicos do estudo são:

- a) estudar as alterações promovidas pela incorporação do resíduo da lapidação do vidro em argamassas de cimento Portland e areia;
- b) caracterizar o resíduo da lapidação do vidro *float*;
- c) estudar a atividade pozolânica do pó de vidro com o cimento Portland;
- d) analisar possíveis efeitos deletérios da incorporação do RLV devido à expansão na reação álcali-sílica.

1.3 Organização do trabalho

O texto foi organizado em cinco capítulos de acordo com a descrição a seguir:

Capítulo 1: introdução ao tema, a justificativa do estudo, os objetivos e a descrição dos capítulos que compõem o trabalho.

Capítulo 2: abordagem dos referenciais teóricos relacionados à pesquisa.

Capítulo 3: materiais utilizados e a metodologia da pesquisa, com descrição dos ensaios realizados.

Capítulo 4: resultados dos ensaios e as discussões acerca destes resultados.

Capítulo 5: conclusões do estudo e propostas de continuidade da pesquisa.

Por último são apresentados os referenciais bibliográficos que nortearam o desenvolvimento da pesquisa e os apêndices com os dados experimentais.

CAPITULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos sólidos e seu uso na construção civil

A construção civil é um setor da economia que apresenta grande consumo de matérias-primas e também grande geração de resíduos sólidos. Devido à grande quantidade de materiais consumidos, muitas pesquisas foram impulsionadas para se estudar os efeitos da reutilização e/ou reciclagem dos materiais de construção, ou ainda, a incorporação de diversos tipos de resíduos na construção civil em alguma etapa de sua cadeia produtiva.

O custo dos materiais de construção tem aumentado devido à escassez de matérias-primas, ao crescimento da demanda e ao alto custo da energia empregada na produção destes materiais, o que favorece o uso de componentes alternativos nos materiais de construção, possibilitando economia de energia e recursos naturais, que é uma preocupação global atual (SAFIUDDIN *et al*, 2010).

O uso de um resíduo, no entanto, não deve ser realizado com base em ideias preconcebidas, mas sim em função das características deste resíduo, para o melhor aproveitamento de suas propriedades físico-químicas, com o menor impacto ambiental possível, e dentro de uma aplicação, quando for o caso, na qual o resíduo se mostre competitivo em relação ao produto convencional (JOHN, 2000).

A definição para resíduos sólidos, segundo a ABNT NBR 10004 (2004) é:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A resolução CONAMA 307 (BRASIL, 2002) estabeleceu diretrizes para a gestão dos resíduos de construção civil, com intuito de disciplinar ações para diminuição nos impactos ambientais gerados pela atividade da construção civil, e classificou os diferentes tipos de resíduos gerados de acordo com as seguintes classes:

Classe A: resíduos que podem ser reutilizados ou reciclados como agregados, como resíduos de construção e demolição (RCD) ou de peças pré-moldadas;

Classe B: outros resíduos recicláveis como, por exemplo, madeira, metais e vidro;

Classe C: resíduos para os quais as tecnologias ou aplicações economicamente viáveis para reciclagem/recuperação

Classe D: resíduos perigosos como tintas, solventes, óleos ou aqueles oriundos de demolições e/ou reformas de instalações industriais.

Resíduos como, por exemplo, rochas, tijolos e blocos cerâmicos ou do concreto poderiam ser classificados, segundo a ABNT NBR10004:2004, como pertencentes à classe II – B que classifica esses resíduos como não perigosos e inertes, exceto para os padrões de aspecto, cor e turbidez nos testes de solubilização do resíduo.

O concreto e argamassa são alguns dos materiais mais consumidos nas obras de construção civil, e são frequentes pesquisas que estudam a incorporação de diversos resíduos nesses compósitos. Costa *et al* (2006) investigaram as propriedades de argamassas contendo resíduo cerâmico em substituição ao agregado miúdo, Evangelista *et al* (2005) avaliaram a substituição do cimento por resíduo cerâmico em argamassas, e Gonçalves *et al* (2002) estudaram a adição do resíduo do corte do granito em concretos. Os resultados obtidos por esses e diversos outros autores mostram que é possível se utilizar uma ampla gama de resíduos em concretos e argamassas, mantendo-se ou até mesmo melhorando algumas propriedades destes compósitos.

Segundo Safiuddin *et al* (2010) as pesquisas sobre uso de resíduos na construção civil, em sua maioria, focam na avaliação dos efeitos do uso desses resíduos nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais produzidos, ou ainda, na avaliação da durabilidade dos produtos devido ao uso dos resíduos. No entanto, os autores entendem que seria necessária uma avaliação mais aprofundada em aspectos

como, por exemplo, relação custo-benefício, avaliação do desempenho do material produzido com resíduo em situações reais, e a avaliação comercial do uso do resíduo, com intuito de incentivar a incorporação dos resíduos na prática.

2.2 O resíduo de vidro e sua incorporação em concretos e argamassas

O vidro é resultante da fusão de uma mistura de diversos óxidos inorgânicos e tem como constituinte principal a sílica (óxido de silício), que enriquece sem cristalizar após sofrer um processo de resfriamento (SICHIERI, CARAM e dos SANTOS, 2007)

Dentre os tipos de vidro existentes, o mais utilizado na construção civil é o denominado sodo-cálcico. Diversos trabalhos realizaram a determinação da composição química do vidro. O resíduo de vidro, quando utilizado com granulometria reduzida, se coloca como um material que pode apresentar atividade pozolânica devido sua composição rica em sílica. A descrição da composição química do vidro está indicada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do vidro

Autores	Composição (%)				
	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O
Matos e Sousa-Coutinho (2012)	70,00	8,70	3,70	1,20	15,57
Tuan <i>et al</i> (2013)	74,00	9,70	0,00	6,00	9,00
Mandandoust e Ghavidel (2013)	73,10	9,79	3,45	1,36	11,10
Carsana, Frassoni e Bertolini (2014)	68,67	11,35	1,41	2,73	13,36
Khmiri, Chaabouni e Samet (2013)	71,44	10,81	1,65	1,70	13,60

O vidro é um material que pode ser reciclado diversas vezes sem modificar suas propriedades, sendo possível produzir 1kg de vidro a partir de 1kg de cacos de vidro (CEBRACE). Ainda que o resíduo de vidro possa ser, quando comparado a outros materiais, facilmente reincorporado no processo de produção de novas peças de vidro, o estudo da incorporação do resíduo de vidro em concretos e/ou argamassas pode ser interessante no intuito de se agregar valor a esse resíduo, permitindo a

diminuição no consumo de cimento Portland ou ainda, melhorando algumas propriedades dos compósitos produzidos.

O uso do resíduo de vidro em argamassas e/ou concretos pode promover alterações nas propriedades do composto produzido, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Fragata *et al* (2007) avaliaram a retenção de água em argamassas de cal e areia comparadas à argamassas de cal, areia e resíduo de vidro. Os autores verificaram uma diminuição na retenção de água nas argamassas com resíduo de vidro.

Algumas aplicações do resíduo de vidro em compostos de cimento Portland são possíveis devido à natureza pozolânica desse resíduo. As pozolanas são substâncias silicosas e aluminosas que, embora não tendo qualidades aglomerantes, quando usadas em combinação com o cimento Portland, reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água e formam compostos resistentes (OLIVEIRA, 2000)

As pozolanas correspondem a um grupo de materiais, naturais ou artificiais, que contém uma grande quantidade de sílica em forma não cristalina. As reações pozolânicas permitem a formação de novos silicatos de cálcio hidratados na matriz. Materiais como as cinzas de combustão do carvão, a palha e a casca de arroz, e a sílica ativa de certos processos metalúrgicos são exemplos de subprodutos industriais que apresentam atividade pozolânica, e que podem ser usados como adições minerais em concretos (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Pereira de Oliveira, Castro Gomes e Fazenda (2010) verificaram que em argamassas com cimento, areia e pó de vidro utilizado em substituição à cal, os valores de retenção de água estavam entre 84% e 94%, abaixo da argamassa de referência com cimento, areia e cal, que apresentou retenção de 96%.

A atividade pozolânica do vidro, ou de qualquer outra pozolana natural ou artificial depende, dentre outros fatores, da composição química e da superfície do material, como ilustra o estudo desenvolvido por Pontes, Silva e Faria (2012), que avaliaram

a atividade pozolânica de diferentes materiais por meio de quatro diferentes tipos de ensaios. Os resultados mostraram diferentes índices de atividade pozolânica para um mesmo material, ao se realizarem ensaios distintos.

Trabalhos como os de Park *et al* (2004), Limbachiya *et al* (2012), Serpa (2013) e Castro e Brito (2013) investigaram a aplicação do resíduo de vidro em diferentes formas como garrafas moídas, granulado de espuma de vidro e outros resíduos de vidro diversos usados como agregados, em substituição parcial à areia, na produção de concretos e argamassas. Os trabalhos mostram que, até determinado percentual de substituição, a incorporação do resíduo de vidro é possível, sem que haja prejuízo da trabalhabilidade ou resistência mecânica dos compósitos. No entanto, os resultados obtidos por estes autores indicam que a incorporação de resíduos de vidro, em granulometria semelhante aos agregados miúdos e/ou graúdos, provoca acréscimo nas expansões devido à reação álcali-sílica, produzindo efeitos deletérios nos compósitos.

2.3 A reatividade álcali-sílica

Compósitos de cimento Portland podem sofrer expansão e fissuração devido a reações químicas entre os álcalis e íons hidroxila da pasta de cimento com certos minerais que podem ser encontrados nos agregados, fenômeno este que pode ser denominado de reação álcali-sílica, ou de uma forma mais geral, reação álcali-agregado (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

A reação álcali-agregado (RAA) é um fenômeno que ocorre no concreto endurecido e que se desenvolve devido à combinação de três agentes: álcalis do cimento, agregado reativo ou potencialmente reativo e a presença constante de umidade.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) a quantidade de álcalis presentes nos cimentos, o consumo de cimentos nos concretos, e a composição mineralógica dos agregados influenciam diretamente reatividade álcali-sílica. Ainda segundo os autores, dependendo do tempo, da temperatura e da dimensão das partículas, todos os silicatos ou minerais de sílica ou ainda, a sílica em estado amorfo (como

é o caso do vidro de sílica), podem reagir com as soluções alcalinas da pasta de cimento.

O mecanismo de deterioração das estruturas de concreto, devido à reação álcali-sílica, se dá pela formação de géis sílico-alcalinos que se expandem pela absorção de água por osmose, podendo causar expansão e fissuração no agregado ou ainda, na pasta de cimento em torno do agregado (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

O controle da expansão devido à reação álcali-sílica envolve aspectos relacionados aos constituintes do concreto, como uso de cimentos com baixo teor de álcalis e agregados não potencialmente reativos, uso de materiais pozolânicos em substituição ao cimento ou como adição, mas também é influenciado por condições como presença de umidade e temperatura ambiente.

A série de normas da ABNT NBR15577:2008, nas seis partes, descreve procedimentos para avaliação do potencial reativo de agregados para uso em concreto, em vista da reação álcali-agregado. A ABNT NBR15577-1:2008 limita em 0,19% a expansão na idade de 30 dias em ensaio acelerado realizado com argamassas de agregados reativos, segundo a ABNT NBR15577-4:2008. O agregado será considerado inócuo caso apresente expansões inferiores a esse valor. Ainda segundo essa norma, consideram-se materiais inibidores da reação álcali-sílica o metacaulim e a sílica ativa em combinação com qualquer tipo de cimento Portland, ou ainda, os cimentos do tipo CPII-E, CPIII, CPII-Z e CPIV, desde que sejam atendidos determinados critérios em ensaios de expansão em prismas de concreto e/ou mitigação da expansão em barras de argamassa.

Shao *et al* (2000) estudaram o uso do vidro finamente moído e cinzas volantes em substituição ao cimento, adicionados em proporções de até 30% em massa. As adições foram realizadas com diferentes dimensões das partículas de vidro. Os autores verificaram que o concreto produzido com a adição de vidro finamente moído (<75 μm) tinha suas propriedades mecânicas melhoradas em função de reações pozolânicas. Para as maiores granulometrias o concreto apresentava problemas de expansões devido a reação álcali/sílica.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) verificaram que a substituição parcial do cimento por vidro moído, em granulometria semelhante ao cimento Portland utilizado, produziu uma redução significativa da expansão devido à reação álcali-sílica, e o uso do pó de vidro ainda contribuiu para o aumento da resistência à penetração de cloreto.

Shayan e Xu (2006) e Matos e Sousa-Coutinho (2012) verificaram que o vidro, quando finamente moído, ao ser adicionado em concretos de cimento Portland apresenta propriedades pozolânicas, e poderia ser usado como supressor da reação álcali-sílica.

Estudo de Shi *et al* (2005) mostrou que uma substituição de 20% do cimento por pó de vidro consegue limitar a expansão em argamassas ao valor de aproximadamente 0,20% que é o limitante superior para que o agregado seja considerado inócuo. O autor verificou em ensaio de mitigação da reação álcali-sílica que seria necessária a substituição de um mínimo de 50% de cimento pelo resíduo de vidro moído, afim de que os efeitos deletérios das expansões em argamassas fossem controlados.

O vidro apresenta grande percentual de sílica e sua incorporação em compósitos de cimento Portland pode, a princípio, potencializar a ocorrência de expansões devido às reações entre os álcalis do cimento e a sílica presente no vidro. A avaliação da incorporação de resíduos de vidro em compósitos de cimento Portland, como blocos, concretos e argamassas, deve ser realizada atentando-se à possibilidade da reação álcali-sílica.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação da incorporação do resíduo de lapidação do vidro partiu de um diagnóstico da geração do material da indústria, estimativa de quantitativo produzido, amostragem do material e caracterização por meio de análise visual, determinação da composição granulométrica e da massa específica.

A atividade pozolânica do resíduo foi estudada por meio da avaliação da resistência mecânica, e por ensaio de reação química do RLV. O estudo da incorporação do RLV em argamassas se deu por meio de um comparativo, entre as propriedades de uma argamassa de referência, sem adição do resíduo, e outras argamassas com diferentes percentuais do resíduo utilizado em substituição ao cimento Portland.

As argamassas foram produzidas com cimento Portland e areia quartzosa de rio, e tiveram suas propriedades avaliadas no estado fresco e no estado endurecido. Foi estudada ainda a possível influência do RLV na expansão devido à reação alcalisílica nessas argamassas.

3.1 O resíduo da lapidação do vidro

O resíduo utilizado neste estudo foi coletado em uma indústria na cidade de Uberlândia, que adquire as placas de vidro *float* (ou vidro plano) e faz o processamento dessas placas para produção de peças de vidro laminado e/ou temperado, dentre outros.

3.1.1 Geração do resíduo

As placas de vidro lapidadas apresentavam dimensões da ordem de 2m×3m. Para a produção das peças laminadas ou temperadas, as placas de vidro são recortadas nas formas e dimensões requeridas e, posteriormente, passam por um processo de lapidação para retirada das arestas cortantes. A lapidação ocorre na presença

de água, e consiste em se fazer um polimento das arestas das peças, produzindo um material granular que fica parcialmente retido nas máquinas polidoras, em sua fração mais grossa, e tem uma porção mais fina transportada em suspensão pela água.

A água contendo os fragmentos de vidro é transportada por gravidade até um tanque e, em seguida, bombeada para uma estação de tratamento. Nesta etapa do processo adicionam-se à água policloreto de alumínio e um polímero aniónico. A combinação destes produtos tem ação floculante e facilita a decantação dos sólidos presentes na água.

A retirada do material decantado ocorre em três diferentes pontos da estação de tratamento. O resíduo é então retirado dos tanques de decantação e depositado, ainda úmido, em *bags* que funcionam como unidades de armazenamento, conforme ilustram as Figuras 1A e 1B.

Figura 1 - (A) *Bags* de armazenamento do resíduo; (b) Aspecto do material úmido depositado no *bag*.



Fonte: Autor (2014)

Os *bags* de armazenamento também atuam como uma espécie de filtro, permitindo que a água escoe e retendo o material granular. Quando os *bags* se encontram cheios são acondicionados em caçambas, e o resíduo é então transportado para ser incorporado na fabricação de novas placas de vidro.

A quantidade de resíduo gerado é estimada pela indústria em cerca de 12 toneladas/mês. O descarte do resíduo para reincorporação na produção de novas

placas de vidro acarreta custos de transporte, uma vez que a indústria produtora das placas se encontra em outro estado.

3.1.2 Coleta e caracterização do resíduo

O resíduo estudado foi coletado diretamente nos bags de armazenamento. Cada bag de armazenamento se refere ao material recolhido em um determinado ponto da estação de tratamento. Para um determinado intervalo de geração do resíduo as massas coletadas em cada *bag* de armazenamento são aproximadamente iguais.

Com intuito de se utilizar nesse estudo a mistura das frações coletadas nos *bags*, foi elaborado um plano de coleta que produzisse amostras representativas de cada um dos *bags* de armazenagem.

A amostragem do resíduo foi realizada segundo as diretrizes da ABNT NBR10007:2004, no decorrer de quatro semanas de funcionamento da indústria. Foram coletadas, diariamente, em cada um dos três *bags* de armazenagem, três amostras simples do resíduo. As amostras coletadas em cada um dos *bags* de armazenagem foram depositadas em baldes e identificadas.

O somatório das amostras simples coletadas em cada *bag* produziu uma amostra composta. Dessa forma, formaram-se três lotes de amostras do resíduo, sendo cada lote relativo a cerca de dez dias de funcionamento da indústria, e composto por três baldes de amostras dos *bags* de armazenagem.

As amostras do material foram identificadas e transportadas para o laboratório de materiais de construção da FECIV. As nove amostras compostas foram secas em estufa, como ilustra a Figura 2, na temperatura de $105^{\circ}\pm5^{\circ}\text{C}$ e, posteriormente, fracionadas e destorreadas, por meio do uso de almofariz e mão de gral. Todas as amostras permaneceram no processo de secagem, em estufa, por um período de 7 dias.

Figura 2 - Processo de secagem, em estufa, das amostras do resíduo



Fonte: Autor (2014)

Após o processo de secagem e destorramento, as frações coletadas nos diferentes bags foram misturadas, tomando-se quantidades iguais, em massa, das frações de cada *bag*. Todos os ensaios desse estudo utilizaram esse resíduo produzido pela mistura das amostras dos diferentes bags de armazenagem.

A massa específica do resíduo foi determinada segundo a ABNT NBR NM23:2001, e para a massa unitária do resíduo utilizou-se a referência da ABNT NBR NM45:2006. A composição granulométrica do resíduo foi determinada por um analisador laser de partículas (Mastersizer MS2000) em colaboração do Laboratório de Separação Sólido-Fluido do curso de Engenharia Química da UFU.

A amostra a ser analisada pelo equipamento foi dispersa em água. A dispersão foi continuamente agitada e bombeada para o interior do equipamento. Um feixe luminoso incidiu sobre a amostra dispersa e os desvios sofridos por esse feixe luminoso são correlacionados à dimensão das partículas. Foram determinadas as seguintes características:

- a) Curva granulométrica;
- b) Diâmetro médio da amostra;
- c) Estimativa da superfície específica;
- d) Diâmetro D_{90} que indica 90% da amostra com partículas de dimensão inferior a esse valor, ou seja, 90% das partículas seriam passantes em uma peneira de abertura D_{90} .

3.1.3 Atividade pozolânica do resíduo

Foi realizado ensaio segundo a ABNT NBR5752:2014, que avaliou a atividade pozolânica do resíduo com o cimento Portland. As diretrizes dessa norma indicam que a pozolanicidade do material é avaliada por meio de um comparativo entre as características de duas argamassas distintas: uma denominada (A), composta por areia normal e cimento Portland; outra denominada (B) composta por cimento Portland, RLV substituindo parcialmente o cimento, e areia normal.

A quantidade de resíduo usada na argamassa B deve ser tal que substitua 35% do volume absoluto de cimento, e a massa de cimento que deve ser substituída na argamassa é determinada por meio de uma equação que relaciona as massas específicas do cimento Portland e do material pozolânico que se está avaliando, no caso o RLV.

Após o período de cura em estufa os corpos de prova foram submetidos a ensaio de ruptura à compressão. A análise da pozolanicidade do material leva em conta a razão $\frac{R_B}{R_A}$ entre as resistências das argamassas B e A. Os requisitos para classificação do material pozolânico estão descritos na ABNT NBR12653:2014.

As frações de areia normalizada usadas no ensaio atendem às especificações da ABNT NBR7214:2012. As argamassas foram misturadas mecanicamente segundo a ABNT NBR7215:1996. Seguindo as prescrições da norma de ensaio da atividade pozolânica, a quantidade de água usada na fabricação das argamassas foi ajustada para que se obtivesse um índice de consistência de $225\pm 5\text{mm}$, determinado segundo a ABNT NBR 13276:2005.

Após um período inicial de cura ao ar por 24h, as argamassas A e B passaram por um período de cura submersa, em recipiente fechado e no interior de uma estufa, conforme ilustra a Figura 3, por um período de 27 dias. A temperatura do ensaio foi ajustada para $38\pm 2^\circ\text{C}$.

Figura 3 - Corpos de prova submersos em água para cura no interior da estufa



Fonte: Autor (2015)

O ensaio apresentou uma adaptação em relação ao tipo de cimento descrito na norma ABNT NBR5752:2012, que indica o uso do cimento CPI, e que neste ensaio foi substituído pelo cimento CPV. A escolha do cimento CPV se deve ao fato deste tipo de cimento apresentar composição mais próxima ao CPI.

Como complemento da avaliação pozolânica do RLV foi determinado também o índice de atividade pozolânica, pelo método Chapelle modificado, que mede a pozolanicidade do material pelo teor de hidróxido de cálcio fixado, segundo as diretrizes da ABNT NBR15895:2010. O ensaio pelo método Chapelle se aplica a materiais silicosos ou sílico-aluminosos, cuja fase amorfa tenha a capacidade de fixar o hidróxido de sódio. O percentual elevado de sílica em estado amorfo presente no vidro permite a realização do ensaio.

3.2 Avaliação das argamassas com RLV

Foi realizado um estudo dos efeitos do RLV em substituição parcial ao cimento Portland em argamassas. As argamassas foram compostas por cimento Portland CPV e areia natural quartzosa. O estudo se deu por meio da comparação entre as propriedades de uma argamassa de referência, sem o resíduo, e outras argamassas produzidas com diferentes percentuais do RLV em substituição ao cimento Portland.

Para a determinação do traço adotado para as argamassas foram usados como referências os trabalhos de Özkan e Yüksel (2008), Matos e Sousa-Coutinho (2012) e Ramos *et al* (2013), que utilizaram a proporção, em massa, de 1 : 3 : 0,5 (cimento : areia : água). No entanto, a relação água/cimento adotada neste estudo apresentou um valor diferente daqueles indicados nos trabalhos citados anteriormente.

O ajuste da quantidade de água no traço da argamassa de referência foi realizado objetivando um índice de consistência no estado fresco de 260 ± 5 mm, determinada segundo a ABNT NBR13276:2005. A argamassa de referência apresentou o índice de consistência requerido para uma relação água/cimento igual a 0,62.

O traço de referência obtido, em massa, foi 1 : 3 : 0,62 (cimento : areia : água). A partir desse traço foram produzidas duas séries distintas de argamassas com RLV, uma primeira série mantendo-se constante a relação água/aglomerante, e uma segunda mantendo-se constante a relação água/cimento.

Foram produzidas duas séries de argamassas, com diferentes percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de vidro. Uma primeira com relação água-aglomerante constante e uma segunda série com relação água-cimento constante. Também foi produzida uma argamassa de referência, sem resíduo, denominada R.

Na primeira série de argamassas, a substituição do cimento pelo RLV variou entre 5% e 25%, em massa. As argamassas produzidas e o percentual de cimento substituído no traço estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2 – Primeira série de argamassas e percentual de resíduo utilizado

Argamassa	Percentual de substituição, em massa, do cimento Portland	Relação água/aglomerante*
R	0	0,62
A	5	0,62
B	10	0,62
C	15	0,62
D	20	0,62
E	25	0,62

*Relação entre a massa de água no traço e a soma das massas de cimento e RLV

Na segunda série de argamassas, a substituição do cimento pelo RLV variou entre 5% e 20%, em massa. As argamassas produzidas e o percentual de cimento substituído no traço estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 – Segunda série de argamassas e percentual de resíduo utilizado

Argamassa	Percentual de substituição, em massa, do cimento Portland	Relação água/cimento
R	0	0,62
2A	5	0,62
2B	10	0,62
2C	15	0,62
2D	20	0,62

Para as duas séries de argamassas foram moldados corpos de prova cilíndricos (5cmx10cm) e prismáticos (4cmx4cmx16cm). A moldagem dos corpos de prova cilíndricos se deu segundo ABNT NBR7215:1996, e para os corpos de prova prismáticos foram seguidas as diretrizes da ABNT NBR13279:2005. Os corpos de prova foram usados em ensaios, no estado endurecido, para se determinar as seguintes características:

- corpos de prova cilíndricos: resistência à compressão, absorção total e massa específica no estado endurecido;
- corpos de prova prismáticos: resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade dinâmico.

As normas de referência utilizadas nos ensaios do estado endurecido estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Normas de referência para ensaios no estado endurecido

Número	Características determinadas no ensaio
NBR 9778	Absorção de água, índice de vazios e massa específica
NBR 13279	Resistência à tração na flexão e na compressão
NBR 13280	Densidade de massa aparente
NBR 15630	Módulo de elasticidade dinâmico através da onda ultrassônica

Para os ensaios das argamassas no estado endurecido, o Quadro 2 descreve os ensaios realizados com cada uma das séries de argamassas, e as idades em que esses ensaios foram realizados.

Quadro 2 - Ensaios realizados e respectivas idades dos corpos de prova

Série de argamassas	Ensaio	Idade de realização (dias)
Relação água/aglomerante constante	Resistência à compressão	7, 14, 28, 63 e 91
	Resistência à tração na flexão, absorção total, massa específica e índice de vazios	28, 63 e 91
Relação água/cimento constante	Resistência à compressão, à tração na flexão, absorção total, massa específica e índice de vazios	28 e 63

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado em prensa eletrônica Instron, com célula de carga de 5KN. O software de controle do equipamento fornece, nos ensaios de flexão, o gráfico tensão versus deformação e as tensões de ruptura. A Figura 4 mostra uma visão geral do equipamento usado no ensaio de tração na flexão, enquanto a Figura 5 mostra o corpo de prova sobre a base de apoio do equipamento.

Figura 4 - Prensa utilizada para ensaio de tração na flexão



Fonte: Autor (2015)

Figura 5 – Prisma de argamassa sobre a base de apoio no ensaio de flexão



Fonte: Autor (2015)

Todos os corpos de prova moldados foram submetidos a um período inicial de cura ao ar, durante 24h, e posteriormente foram mantidos em cura submersa em água alcalina, até a data de realização dos ensaios como ilustra a Figura 6.

Figura 6 - Tanque para cura submersa dos corpos de prova



Fonte: Autor (2015)

A produção das argamassas foi realizada mecanicamente em argamassadeira. Nos traços onde havia substituição do cimento pelo RLV, a mistura cimento+RLV foi previamente homogeneizada no interior de um balde que, posteriormente tampado, foi agitado por 2min, conforme ilustram as Figuras 7A e 7B.

Figura 7 - (A) Mistura dos materiais na argamassadeira; (B) Recipiente para homogeneização da mistura de cimento e RLV



Fonte: Autor (2015)

O preparo de todas as argamassas foi realizado seguindo as orientações da ABNT NBR13276:2005, com adaptações no tempo de mistura dos materiais conforme a sequência descrita a seguir:

- adicionou-se toda a água na cuba da argamassadeira;

- b) adicionou-se o cimento (ou mistura de cimento e RLV) à agua e os materiais foram misturados por 1min, em velocidade baixa;
- c) adicionou-se toda areia à pasta de cimento, em um intervalo de tempo de 1min, sem desligar a argamassadeira. Todos os materiais foram misturados, em velocidade baixa, por 2min;
- d) a argamassa descansou por 15min coberta por um pano úmido e, em seguida, foi homogeneizada manualmente durante 1min.

Logo após a homogeneização da mistura as argamassas foram submetidas aos ensaios de caracterização no estado fresco, com determinação do índice de consistência, da densidade de massa, teor de ar incorporado e retenção de água. As normas de referência utilizadas nos ensaios do estado endurecido estão descritas no Quadro 3.

Quadro 3 - Normas de referência para ensaios no estado fresco

Norma	Características determinadas no ensaio
ABNT NBR 13276	Índice de consistência
ABNT NBR 13277	Retenção de água
ABNT NBR 13278	Densidade de massa e teor de ar incorporado

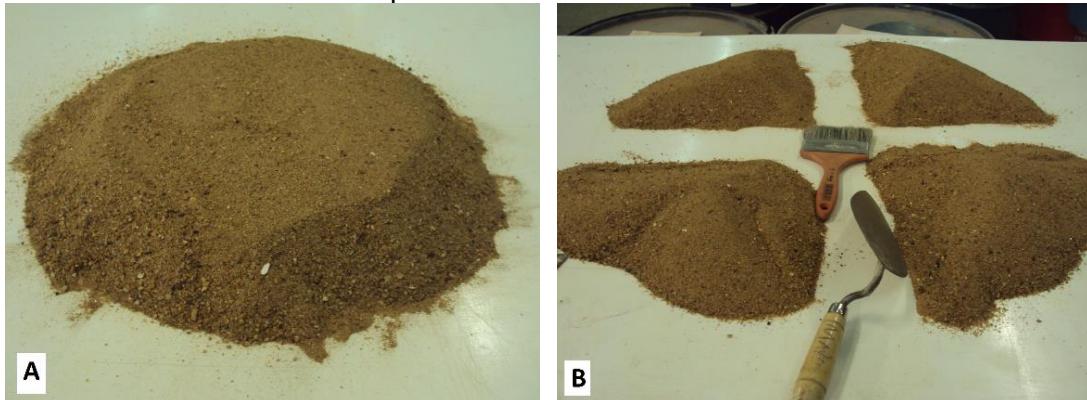
3.3 Caracterização do agregado miúdo e do cimento

O cimento usado nesse estudo foi o CPV, adquirido em loja comercial da cidade de Uberlândia. O cimento foi caracterizado pela determinação da massa específica, segundo a ABNT NBR NM23:2001, e da finura pelo método da permeabilidade, de acordo com a ABNT NBR NM76:1998.

As argamassas usadas no estudo comparativo foram produzidas com areia natural quartzosa, adquirida em loja comercial da cidade Uberlândia. A areia natural foi caracterizada pela determinação da massa específica, segundo a ABNT NBR NM52:2009 e da composição granulométrica, conforme diretrizes da ABNT NBR NM248:2003.

As amostras de areia usadas nos ensaios de caracterização foram coletadas em pilhas do material, depositadas no Laboratório de Materiais de Construção da FECIV, de acordo com as diretrizes da ABNT NBR NM26:2009. Seguindo as prescrições da ABNT NBR NM27:2001, as amostras coletadas foram reduzidas por quarteamento, como ilustram as Figuras 8A e 8B.

Figura 8 - (A) Tronco de cone de agregado miúdo; (B) Tronco de agregado pós quarteamento da amostra



Fonte: Autor (2015)

3.4 Avaliação da reatividade álcali-sílica

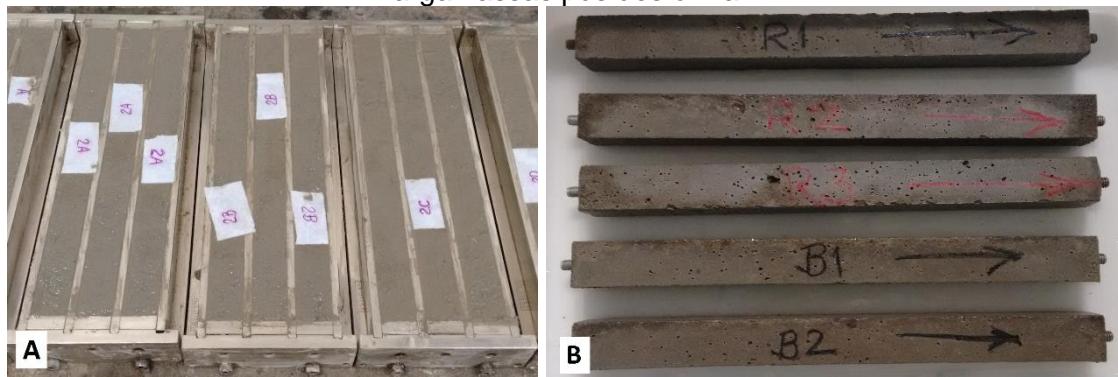
O vidro é composto por grande percentual de sílica, o que pode produzir expansões na reação álcali-sílica quando esse material é usado em conjunto com o cimento Portland. Foi estudada a expansão nas argamassas com substituição parcial do cimento Portland pelo RLV, com base nas diretrizes da ABNT NBR15577-4:2008, que avalia a expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.

O ensaio definido por essa norma se aplica a argamassas fabricadas com agregados potencialmente reativos, e avalia a expansão em barras de argamassa, imersas em solução de NaOH, à temperatura de $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$. A análise do potencial reativo do agregado, ou ainda, da mitigação promovida pelo cimento e/ou materiais inibidores de expansão, é feita com base nas expansões das barras de argamassas, nas idades de 16 e 30 dias, segundo a ABNT NBR 15577-1:2008.

No entanto, nesse estudo não foram utilizados agregados potencialmente reativos. Para todos os traços de argamassa produzidos foram moldadas barras de

argamassa que, posteriormente a um período inicial de cura em câmara úmida, foram imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH), em concentração ($1\pm0,01$)N, colocados em estufa na temperatura de $(80\pm2)^\circ\text{C}$, e tiveram suas expansões medidas ao longo de 30 dias, conforme instruções da ABNT NBR15577-4:2008. As Figuras 9A e 9B ilustram os corpos de prova logo após a moldagem e pós desforma.

Figura 9 - (A) Barras de argamassa para ensaio de expansão; (B) Aspecto das barras de argamassas pós desforma



Fonte: Autor (2015)

Os efeitos da expansão na reação álcali-sílica, entre os compostos do cimento e a sílica presente no resíduo de vidro, foram analisados de forma comparativa, por meio da determinação das expansões apresentadas pelas barras das diferentes argamassas produzidas. As barras de argamassa foram acondicionadas em recipientes plásticos, submersas na solução de hidróxido de sódio e levadas à estufa, como ilustra a Figura 10, e permaneceram nessa condição por 30 dias.

Figura 10 - Barras de argamassa acondicionadas em estufa para ensaio de expansão



Fonte: Autor (2015)

Durante o período em que as barras estiveram na estufa, as expansões foram medidas nas seguintes idades: 6, 9, 13, 16, 20, 23, 27 e 30 dias. As variações de comprimento, com precisão de 0,001mm, foram determinadas por meio de um relógio comparador fixado em equipamento próprio para medida das expansões nas barras, como ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Equipamento usado para medida das expansões nas barras de argamassa



Fonte: Autor (2015)

3.5 Adequações, quantidade de ensaios e análise estatística dos dados

A avaliação estatística dos dados se deu segundo a Análise da Variância e as médias das grandezas determinadas foram comparadas por meio do teste de Tukey. Na análise dos dados utilizou-se o critério de Chauvenet, para exclusão de valores com maior desvio em relação à média. No capítulo de Análises e Resultados são apresentados os valores médios das grandezas avaliadas.

O planejamento experimental foi organizado de modo que em cada ensaio realizado, o número de medições e/ou corpos de prova fosse igual ou superior à quantidade mínima indicada nas normas de ensaio e ainda, de acordo com informações da literatura. A Tabela 4 descreve a quantidade mínima de corpos de

prova indicados nas normas de ensaio, e o número de ensaios realizados nesse estudo.

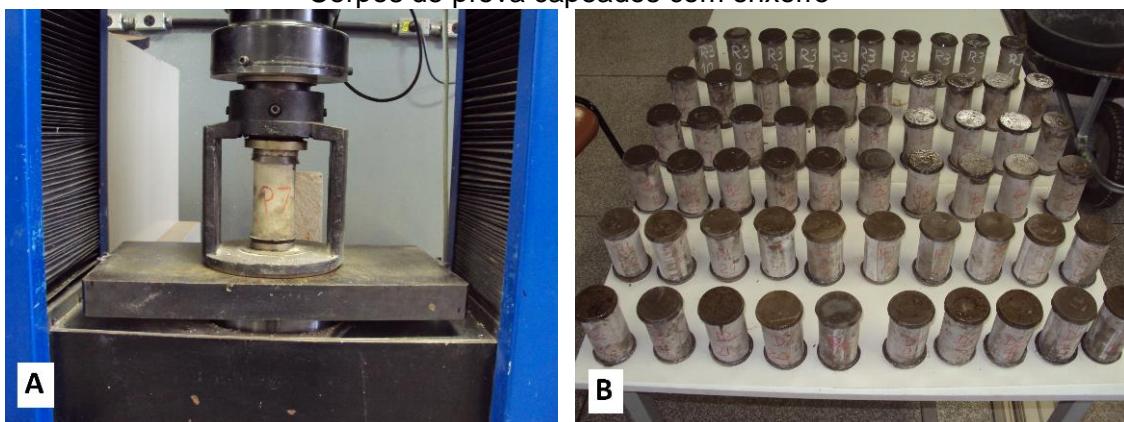
Tabela 4 - Número de ensaios realizados para cada propriedade das argamassas

Propriedade	Mínimo de corpos de prova por norma	Número de ensaios realizados
Absorção total, massa específica e índice de vazios	2	4
Resistência à tração na flexão	2	6
Resistência à compressão	4	10
Expansão na reação álcali-sílica	3	3

No ensaio de resistência à compressão foram utilizados corpos de prova cilíndricos, que não estão de acordo com a ABNT NBR13279:2005, que prescreve o uso das metades dos corpos de prova prismáticos usados no ensaio de flexão, para posterior determinação da resistência à compressão. No entanto, por se tratar de um estudo comparativo, optou-se pelas formas cilíndricas para confecção dos corpos de prova devido, principalmente, ao número elevado de corpos de prova necessários nesse estudo e à disponibilidade, em pequeno número, de formas prismáticas.

Os ensaios de compressão foram realizados em prensa EMIC eletrônica, e os corpos de prova foram capeados com enxofre para planicidade das faces, como ilustram a Figuras 12A e 12B.

Figura 12 - (A) Detalhe de corpo de prova em acessório para ensaio à compressão; (B) Corpos de prova capeados com enxofre



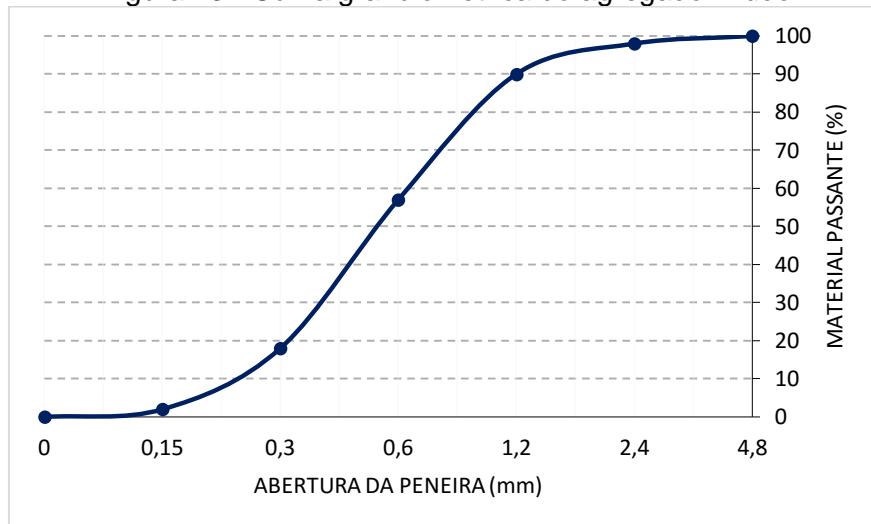
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cimento e agregado miúdo

O cimento CPV apresentou massa específica igual a 3110 kg/m^3 , valor coerente com aqueles geralmente encontrados na literatura para o cimento Portland. A massa específica da areia natural foi de 2640 kg/m^3 .

A areia apresentou dimensão máxima característica 2,4mm, módulo de finura 2,4 e granulometria ilustrada na Figura 13.

Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2015)

O cimento CPV utilizado apresentou superfície específica igual a $497 \text{ m}^2/\text{kg}$ e resistência característica de 18,8 MPa para idade de 1 dia, 25,2 MPa para 3 dias e 30,6 MPa na idade de 7 dias. Os valores de resistência mecânica do cimento atenderam aos requisitos mínimos normativos nas idades de 1 dia e 3 dias, no entanto, para a idade de 7 dias a resistência obtida foi menor que o valor mínimo estipulado em norma, de 34 MPa.

4.2 Caracterização física do resíduo

Todas as amostras do resíduo de lapidação do vidro coletadas na indústria se apresentaram em estado úmido. Após serem depositadas nos baldes, o material se decantou e as amostras do RLV visualmente se apresentaram em pasta, como ilustra a Figura 14.

Figura 14 – Amostra de resíduo armazenado em bandejas para secagem



Fonte: autor (2014)

Após a secagem nas bandejas o material formou uma espécie de placa que, visualmente, parecia ser de difícil fracionamento. No entanto, esta placa se desfez de maneira relativamente fácil, produzindo um material granular. Esse material granular, após o destorroamento, originou um pó bastante fino. As Figuras 15A e 15B ilustram o aspecto do resíduo após a secagem em estufa.

Figura 15 - (A) Aspecto do resíduo após secagem e fracionamento inicial; (B) Resíduo seco e destorrado

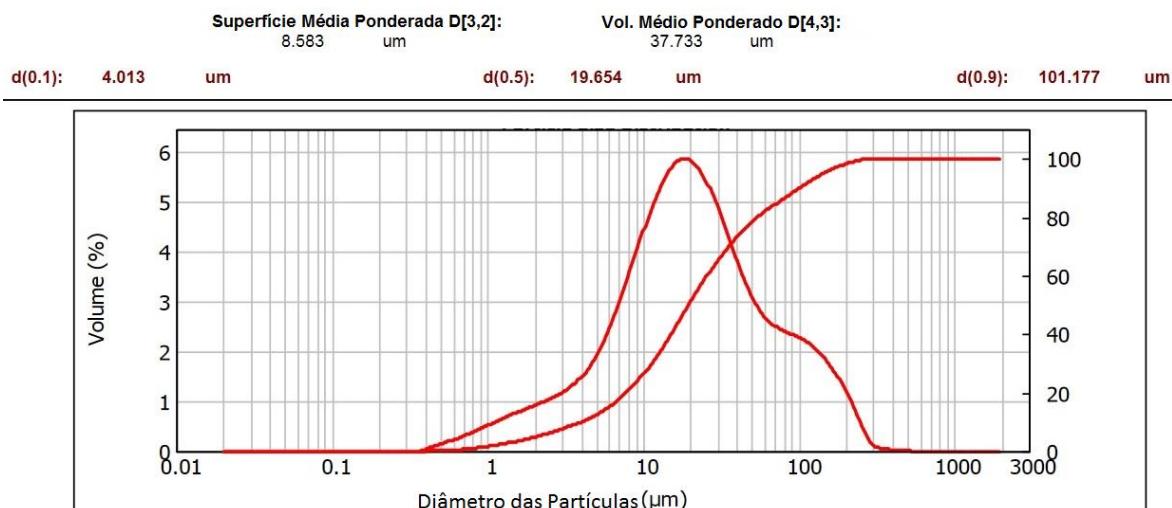


Fonte: autor (2014)

A massa específica obtida para o resíduo seco e destorroado foi de 2480 kg/m³, valor próximo daqueles encontrados na literatura em trabalhos que investigaram a substituição parcial do cimento por vidro moído como, 2500 kg/m³ (IDIR, CYR e TGNIT-HAMOU, 2010), 2490 kg/m³ (SCHWARZ, CAM e NEITHALATH, 2008), 2510 kg/m³ (TAHA e NOUNU, 2008) e Nassar e Soroushian (2012), que obtiveram o valor 2460 kg/m³.

O resíduo apresentou distribuição granulométrica com 90% das partículas de dimensão inferior a um diâmetro de aproximadamente 101,2 µm. O diâmetro médio das partículas foi cerca de 19,6 µm e 10% das partículas com dimensão inferior a 4,0 µm. A granulometria do RLV corrobora a impressão visual e táctil que se trata de um material pulverulento, como ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Curva granulométrica do RLV.



Fonte: Autor (2014)

O valor da superfície específica do RLV foi 282 m²/kg, determinada a partir do diâmetro D[3,2] por meio da seguinte equação:

$$SS = \frac{6000}{\gamma \cdot D[3,2]}$$

Onde:

SS: superfície específica (m²/kg)

γ : massa específica (kg/m³)

Na literatura são encontrados diferentes valores para a superfície específica do vidro moído, usado como material suplementar ao cimento, como nos estudos de Pereira de Oliveira, Castro Gomes e Santos (2012), com o valor de 292 m²/kg e os resultados obtidos por Calmon *et al* (2014) com 783 m²/kg. Nos estudos realizados por esses autores, é possível observar uma distribuição granulométrica do pó de vidro diferente daquela determinada para o RLV. No caso do resíduo de vidro obtido por moagem, as dimensões e o formato dos grãos estão relacionados ao tempo de moagem e tipo de equipamento usado para este fim.

Os diferentes valores obtidos para as superfícies específicas nesses trabalhos, quando comparados ao RLV, estão relacionados à forma e dimensões das partículas. O pó de vidro usado nesse estudo foi obtido a partir da lapidação das placas de vidro *float* e não passou por nenhum processo de moagem pós coleta, somente secagem e destorramento. Dessa forma, não cabe analisar comparativamente as dimensões dos grãos e a superfície específica do material.

Segundo Oliveira (2000) a superfície específica do cimento é o fator que governa a velocidade das reações de hidratação, e influencia em muitas qualidades da pasta e das argamassas. Assim, ressalta-se a importância da superfície específica na aplicação do RLV como material suplementar ao cimento Portland, pois a finura do material influencia diretamente a reação com os compostos hidratados do cimento, e formação de novos materiais resistentes.

4.3 Atividade pozolânica do resíduo

De acordo com a ABNT NBR12653:2014, um dos requisitos para que o material seja considerado pozolânico é que, em um ensaio de peneiramento, o total retido na peneira de abertura 45 µm seja inferior a 20% do material. A curva granulométrica do RLV indica valores em torno de 75% do material com dimensão inferior a 45 µm, o que não atenderia aos requisitos normativos, ainda que o valor determinado graficamente seja próximo ao requerido em norma.

Os resultados do ensaio de atividade pozolânica do RLV com o cimento Portland, avaliado pela resistência comparativa de argamassas de cimento e areia normal, estão descritos na tabela 5.

Tabela 5 - Atividade pozolânica do resíduo com o cimento Portland

Argamassa	Água requerida (g)	Tensão (MPa)	Índice de atividade pozolânica
A	368,4	27,3	
B	388,8	28,4	104%

A argamassa B foi produzida com substituição parcial do cimento pelo resíduo de vidro, enquanto a argamassa A foi produzida somente com o cimento CPV. Os valores encontrados para as tensões de ruptura à compressão indicaram uma maior resistência para a argamassa B, e uma relação $\frac{R_B}{R_A}$ que resultou num índice de atividade pozolânica com o cimento Portland de 104%. Segundo os resultados, o índice de atividade pozolânica atendeu aos requisitos da ABNT NBR12653:2014, que exige um valor maior ou igual a 90% para a relação entre as tensões de ruptura das argamassas B e A.

Em sua versão anterior, do ano de 2012, a ANBT NBR12653, trazia como requisito para o material pozolânico o denominado teor de água requerida, dado pela relação entre as quantidades de água usadas nas argamassas B e A para que elas atingissem o índice de consistência exigido no ensaio. As exigências dessa versão da norma eram de que a água requerida não ultrapassasse 115% ou 110%, dependendo da classe do material pozolânico. A quantidade de água requerida para o RLV nesse estudo foi de 105%, o que atenderia a esse requisito.

Ainda que a água requerida não seja indicada pela norma atual como requisito para que o material seja considerado pozolânico, vale ressaltar que as consistências das argamassas podem ser afetadas pela substituição do cimento Portland por outros materiais suplementares, e em alguns casos torna-se necessário o uso de aditivos plastificantes, caso se deseje manter a consistência no estado fresco, sem se alterar a relação água/cimento.

O estudo de Paiva *et al* (2010) apresentou índice de atividade pozolânica de 104%, no ensaio da ABNT NBR5752:1992. O autor analisou a atividade pozolânica do resíduo ultrafino de vidro moído, com diâmetro médio 5,2 μm e 90% do material com dimensão inferior a 17,2 μm . Souza *et al* (2010) avaliaram a atividade pozolânica do resíduo da lapidação de vidro, e obtiveram um índice de atividade pozolânica de 65%, para um material com 75% em massa passante pela peneira de 75 μm . Shi *et al* (2005) determinaram diferentes valores para o índice de atividade pozolânica, entre 70% e 110%, usando pó de vidro com diferentes granulometrias em concretos, e promovendo diferentes temperaturas de cura.

Os valores obtidos nos estudos desses autores foram na idade de 28 dias, mas houve nos estudos de Shi *et al* (2005) diferenças em relação à cura dos corpos de prova que ocorreu, em alguns casos, em temperaturas diferentes daquela indicada no ensaio da ABNT NBR5752:2012. As diferentes temperaturas foram usadas para se ilustrar os efeitos da elevação da temperatura na atividade pozolânica, e o consequente ganho de resistência diferenciadas dos corpos de prova curados em situações diferentes.

As diferenças entre os valores do índice de atividade pozolânica obtidos nesse estudo e aqueles que aparecem na literatura, podem estar relacionadas às diferentes dimensões, formas e superfícies específicas dos materiais utilizados. Há ainda a influência da cura térmica que potencializa as reações pozolânicas. A comparação dos resultados deve ser feita levando-se em conta esses fatores.

No ensaio Chapelle modificado, para medir o teor de hidróxido de cálcio fixado, o resultado obtido nesse estudo para o RLV foi de 1180mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de RLV. O resultado se apresenta superior àqueles encontrados na literatura. Pontes, Silva e Faria (2012) descreveram resultados da ordem de 300 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de pó de vidro, para uma superfície específica de 156 m^2/kg do resíduo de vidro utilizado. Sousa Neto e Vasconcelos (2014) relataram valores de 828 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g de pó de vidro moído, e 733 mg de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ por g resíduo de vidro não moído com partículas de vidro moído com diâmetro médio de 11 μm e diâmetro médio de aproximadamente 52 μm para o vidro não moído.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a atividade pozolânica do material está relacionada às suas características mineralógicas, à forma e à dimensão das partículas que definem sua superfície específica. As diferenças entre o resultado obtido no ensaio Chapelle modificado nesse estudo e os demais encontrados na literatura poderiam estar relacionadas às diferentes superfícies específicas dos resíduos de vidro usados nos ensaios.

4.4 Estudo comparativo das argamassas

4.4.1 Traços das argamassas

A partir do traço em massa da argamassa de referência, 1:3:0,62 (cimento:areia:água), foram elaborados os demais traços com substituição parcial do cimento Portland pelo RLV, considerando-se o volume específico de cimento a ser substituído na mistura, com determinação do traço em volume específico de materiais, e posterior conversão para a proporção em massa. Na Tabela 6 estão indicados os traços obtidos para as argamassas com relação água/aglomerante constante e igual a 0,62.

Tabela 6 - Argamassas estudadas com relação água/aglomerante constante

Argamassa	Massa substituída de cimento (%)	Traço em massa (cimento : RLV : areia : água)	Consumo teórico de cimento (kg/m ³)
R	0	1 : 0 : 3,000 : 0,620	481
A	5	1 : 0,042 : 3,126 : 0,646	461
B	10	1 : 0,089 : 3,266 : 0,675	441
C	15	1 : 0,141 : 3,422 : 0,707	420
D	20	1 : 0,199 : 3,598 : 0,744	399
E	25	1 : 0,266 : 3,797 : 0,785	377

Para o estudo das argamassas com relação água/cimento constante, as misturas foram produzidas com até 20% de substituição do cimento. A argamassa com 25% em massa de RLV apresentou consistência muito seca, de difícil manipulação e com segregação de materiais. Os traços foram determinados de forma semelhante às misturas com relação água/aglomerante constante, considerando o volume específico de cimento a ser substituído na mistura e determinando a proporção de

materiais em volume com posterior conversão para o traço em massa. A Tabela 7 descreve os traços determinados para as argamassas com relação água-cimento constante.

Tabela 7 - Traços de argamassa para relação água/cimento constante

Argamassa	Massa substituída de cimento (%)	Traço em massa cimento : RLV : areia : água	Consumo teórico de cimento (kg/m ³)
2A	5	1 : 0,042 : 3,045 : 0,620	474
2B	10	1 : 0,089 : 3,094 : 0,620	465
2C	15	1 : 0,141 : 3,149 : 0,620	456
2D	20	1 : 0,199 : 3,208 : 0,620	447

Os traços das argamassas com relação água/cimento constante quando comparados aos traços da série com relação água/aglomerante constante, foram elaborados de modo a apresentarem uma mesma relação volumétrica pasta/agregado, para as misturas com igual percentual de RLV. Tomando-se como exemplos argamassas com 10% de RLV, B e 2B, as duas misturas apresentam mesma relação volume de pasta/volume de agregado. Tal consideração foi adotada afim de se possibilitar melhores comparações entre os valores de resistência mecânica das argamassas, tendo em vista a fragilidade na zona de transição pasta/agregado, influenciada pelo volume de pasta na argamassa.

4.4.2 Índice de consistência e densidade de massa no estado fresco

Segundo o teste de Tukey as argamassas apresentaram diferenças significativas em suas densidades de massas e no índice de consistência no estado fresco. Os resultados do ensaio de densidade de massa estão indicados na Tabela 8.

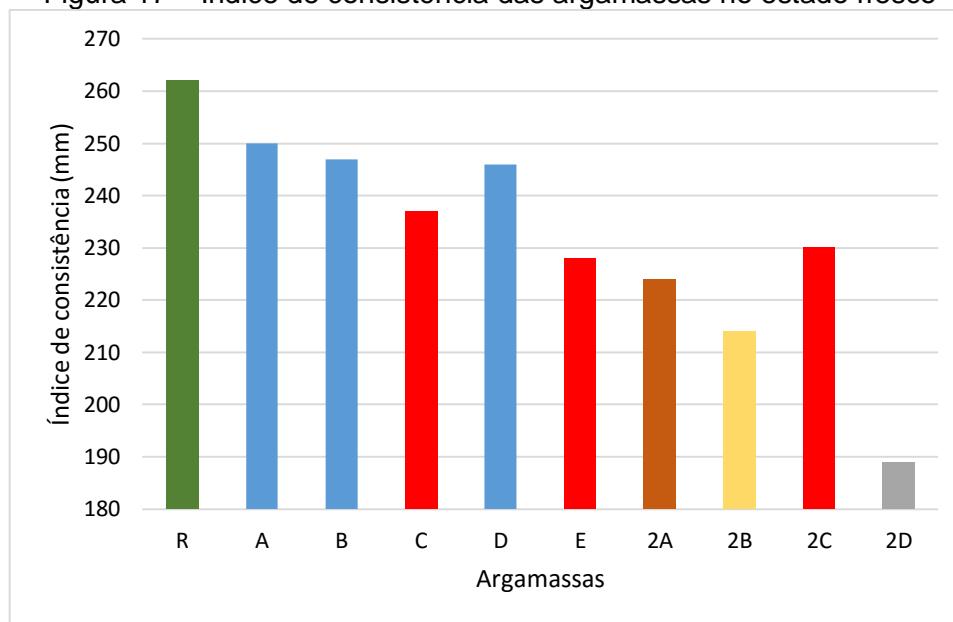
Tabela 8 - Densidade de massa das argamassas no estado fresco

Argamassa	R	A	B	C	D	E	2A	2B	2C	2D
Densidade de massa (kg/m ³)	2044	2053	2032	2033	2042	2022	2078	2085	2101	2130
	d *	d	e f	e	d e	f	c	b c	b	a

* A mesma letra junto aos valores de densidade indica, segundo o teste de Tukey, que os valores não diferem significativamente. Letras diferentes mostram valores significativamente diferentes.

Na Figura 17 estão apresentados os resultados para o ensaio de índice de consistência, com os dados agrupados segundo o teste de Tukey.

Figura 17 – Índice de consistência das argamassas no estado fresco



Nota: No gráfico, as barras representadas na mesma cor indicam argamassas que não diferem significativamente segundo o teste de Tukey.

Fonte: Autor (2015)

A análise do índice de consistência das argamassas indicou que, em relação à argamassa de referência, as argamassas com relação água/cimento constante foram as que apresentaram uma maior diminuição na fluidez da mistura. Tal comportamento era esperado, uma vez que o índice de consistência, segundo Carasek (2007) é influenciado pela relação água/materiais secos, pela forma e textura superficial dos grãos e pela quantidade de pasta de cimento existente na mistura. por cor

Nas argamassas com relação água/cimento constante, a substituição do cimento pelo RLV, material insolúvel, provoca diminuição na relação água/materiais secos influenciando na “lubrificação” das partículas do sistema. As misturas com maiores percentuais de RLV tornaram-se menos fluidas, como foi observado para a argamassa 2D, que apresentou índice de consistência de 189mm, uma redução de aproximadamente 28% em relação à argamassa de referência.

No entanto, ainda que a argamassa 2D tenha apresentado uma redução significativa em sua fluidez, como demonstraram os valores dos índices de consistência das argamassas, vale ressaltar que todas as argamassas analisadas

nesse estudo se mostraram com consistência plástica e sem segregação de materiais. A Figura 18 ilustra o ensaio de medida do índice de consistência da argamassa 2D.

Figura 18 - Aspecto da argamassa 2D no ensaio do índice de consistência



Fonte: Autor (2015)

A análise segundo o teste de Tukey mostrou que os índices de consistência obtidos para as argamassas A, B e D não foram significativamente diferentes. O mesmo ocorreu entre as argamassas C, 2C e EA, e entre as misturas 2C, E e 2A. A argamassa E, quando comparada à argamassa de referência, foi a que apresentou maior redução no índice de consistência. As reduções mais expressivas no índice de consistência foram observadas nas misturas com relação água/cimento constante.

Também se observou uma tendência de diminuição no índice de consistência para todas as argamassas, à medida que se aumentou o percentual de RLV na mistura. Porém, ao se compararem os índices de consistência das argamassas C e D, verificou-se que a argamassa com maior percentual de resíduo apresentou maior diâmetro de espalhamento, o que também ocorreu na comparação entre as argamassas 2B e 2C.

Tal comportamento, contrário à tendência de diminuição da fluidez, pode estar associado ao efeito fíler provocado pela adição do RLV à mistura, facilitando a

movimentação das partículas e aumentando o espalhamento da argamassa no ensaio de medida do índice de consistência.

O estudo de Ramos *et al* (2013) mostrou que a substituição de 10% ou 20% do cimento por pó de vidro não altera significativamente as propriedades do concreto no estado fresco, como a viscosidade e a fluidez. Ainda que os autores tenham realizado o estudo com concreto auto-adensável, os resultados obtidos ilustram a manutenção das propriedades no estado fresco quando se faz a substituição do cimento Portland pelo pó de vidro, o que também foi observado nesse estudo com argamassas para as propriedades do índice de consistência e densidade de massa no estado fresco.

No estudo de Matos e Sousa-Coutinho (2012), argamassas produzidas com vidro moído em substituição ao cimento Portland nos teores de 10% e 20%, apresentaram um ligeiro acréscimo no índice de consistência determinado pelo espalhamento na mesa de consistência. No estudo desses autores, em ensaio realizado segundo a ASTM C230-08, as argamassas com pó de vidro apresentaram índice de consistência de 204 mm e 206 mm, enquanto a argamassa de referência, sem substituição do cimento, teve índice de consistência de 200 mm. Todas as argamassas apresentavam mesma relação água/cimento.

Os valores de densidade de massa das argamassas com RLV, ainda que significativamente diferentes segundo o teste de Tukey em algumas comparações, apresentaram pequena variação percentual tanto em relação à argamassa de referência, quanto em relação aos diferentes percentuais de resíduo. Conforme ilustraram os dados da Tabela 8, as densidades das argamassas R, A e D não foram significativamente diferentes. O mesmo ocorreu para as densidades das argamassas B, C e D e ainda, quando se compararam as densidades das argamassas 2C com 2B e 2A com 2B.

Na análise comparativa das densidades, ainda que sejam tomados os valores extremos (maior e menor valor de densidade) indicados anteriormente na Tabela 8, a diferença máxima de aproximadamente 5% ocorreu entre as densidades da

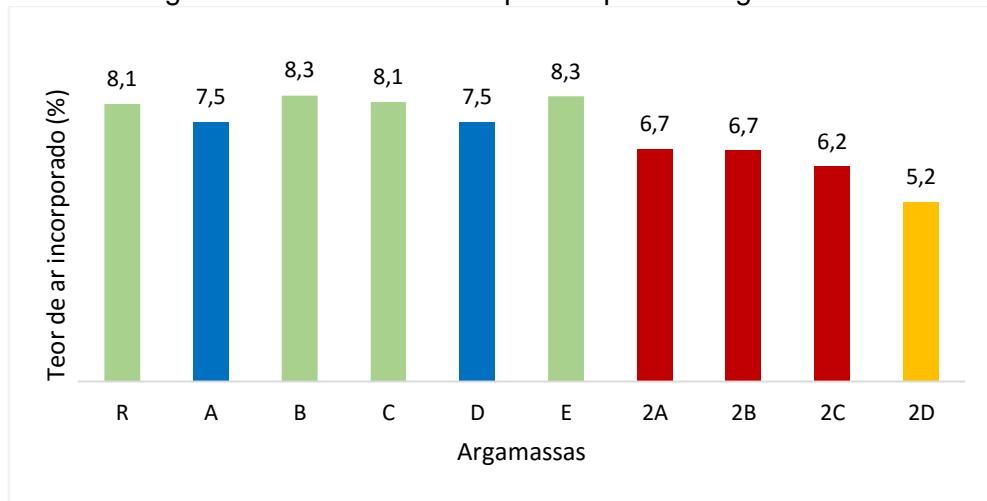
argamassa 2D (2130 kg/m^3) e da argamassa E (2022 kg/m^3), indicando pequenas variações entre as densidades de massa no estado fresco e ainda, uma tendência à manutenção nos valores de densidade de massa no estado fresco, independentemente do percentual de resíduo na argamassa.

O menor valor de densidade da argamassa E pode estar relacionado às diferenças entre as massas específicas do cimento e do resíduo, e o maior percentual de RLV presente nessa argamassa. As argamassas com relação água/cimento constante apresentaram valores de densidade mais elevados em comparação às argamassas com relação água/aglomerante constante. Tal comportamento poderia estar relacionado à menor quantidade de água no traço. No entanto, como descrito anteriormente, alguns valores de densidade não apresentam diferenças significativas segundo o teste de Tukey e, mesmo nos casos em que houve valores significativamente distintos, as variações foram percentualmente pequenas.

4.4.3 Teor de ar incorporado e retenção de água

A Figura 19 ilustra os resultados do teor de ar incorporado nas argamassas. Os resultados do ensaio encontram-se agrupados segundo o Teste de Tukey.

Figura 19 – Teor de ar incorporado para as argamassas



Nota: No gráfico, as barras apresentadas na mesma cor indicam argamassas com teores de ar que não diferem significativamente segundo o teste de Tukey.

Fonte: Autor (2015)

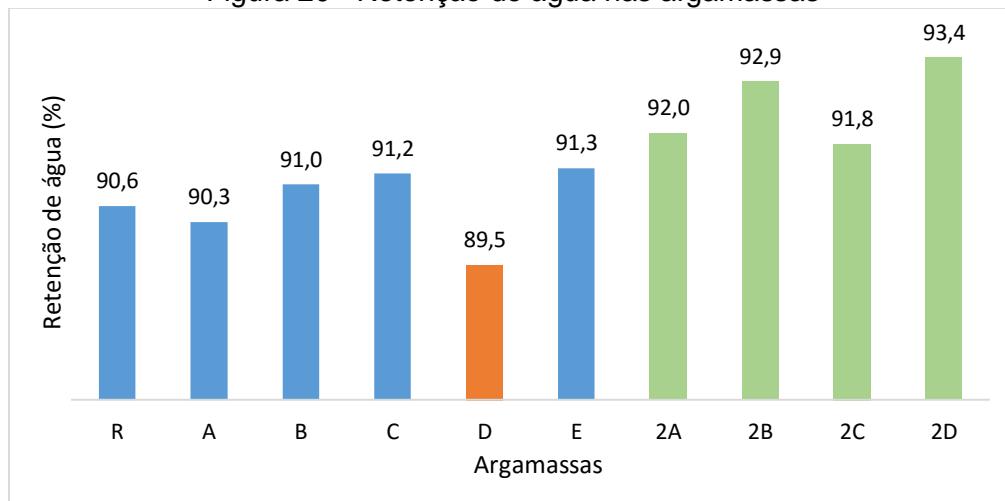
Segundo o teste de Tukey há diferenças significativas no teor de ar incorporado nas argamassas. Na comparação entre as duas séries de argamassas, relação

água-cimento constante e relação água-aglomerante constante, a série com a/c constante apresentou menores teores de ar incorporado.

Os teores de ar incorporado nas argamassas foram coerentes com os valores apresentados anteriormente para a densidade de massa, pois segundo Carasek (2007) a densidade de massa de uma argamassa varia inversamente com o teor de ar incorporado. Dessa forma, os menores teores de ar incorporado nas argamassas 2A, 2B, 2C e 2D estão relacionados às maiores densidades de massa, conforme foi descrito anteriormente na Tabela 8.

A Figura 20 ilustra os resultados obtidos para a retenção de água das argamassas, agrupados de acordo com o teste de Tukey.

Figura 20 - Retenção de água nas argamassas



Nota: No gráfico, as barras representadas na mesma cor indicam argamassas com retenções de água que não diferem significativamente segundo o teste de Tukey.

Fonte: Autor (2015)

O teste de Tukey mostrou que existem diferenças significativas entre os valores do ar incorporado nas argamassas, principalmente quando se comparam as argamassas da série com relação água-aglomerante constante e as argamassas da série de argamassas com relação água-cimento constante. No entanto, entre as argamassas 2A, 2B, 2C e 2D, da série com a/a constante a diferença nas retenções de água não é significativa e o mesmo ocorre entre as argamassas R, A, B, C e E.

A menor retenção de água na série de argamassas com relação água-aglomerante constante pode ser associada à quantidade de água presente na mistura. O aumento na relação água-cimento possibilita maior quantidade de água presente na mistura e segundo Carasek (2007), esse efeito associado à menor quantidade de cimento para formação de uma pasta mais densa pode promover menor retenção de água, uma vez que essa retenção é influenciada pelos finos presentes na composição da argamassa.

Ainda que as argamassas desse estudo não sejam, necessariamente, utilizadas para revestimento, somente para fins de comparação, os valores de retenção obtidos nos ensaios desse estudo permitiram que todas as argamassas fossem enquadradas na classe U4 segundo a ABNT NBR13281:2005.

Os resultados desse estudo indicaram uma tendência de aumento na retenção de água e diminuição no ar incorporado, à medida que ocorreu o acréscimo na quantidade de RLV na mistura. Esse comportamento foi observado nas duas séries de argamassa, no entanto, é mais relevante na série com relação água-cimento constante.

Na literatura não há grande quantidade de resultados de ensaios de caracterização, no estado fresco, de argamassas com resíduo de vidro, o que dificulta a análise comparativa dos resultados obtidos nesse estudo. Os estudos de Fragata *et al* (2007) mostraram diminuição na retenção de água em argamassas de areia e cal com adição de resíduo de vidro, resultado semelhante àquele obtido por Pereira de Oliveira, Castro Gomes e Fazenda (2010) para argamassas que continham resíduo de vidro em substituição à cal.

4.4.4 Consumo de cimento

A partir dos teores de ar incorporado, das massas específicas dos materiais componentes e da densidade de massa no estado fresco foi determinado o consumo de cimento por m^3 de argamassas. Os valores destes consumos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores dos consumos de cimento das argamassas

Argamassa	Massa de RLV (%)	Ar Incorporado (%)	Consumo de cimento (kg/m ³)
R	0	8,1	444
A	5	7,5	428
B	10	8,3	405
C	15	8,1	387
D	20	7,5	370
E	25	8,3	347
2A	5	6,7	443
2B	10	6,7	435
2C	15	6,2	428
2D	20	5,2	425

Quando se comparam duas argamassas com mesmo percentual de resíduo na mistura, por exemplo, D (a/a constante) e 2D (a/c constante), o consumo de cimento na argamassa D é significativamente menor devido à maior quantidade de água presente no traço das argamassas com relação água-aglomerante constante.

4.4.5 Índice de vazios e absorção no estado endurecido

O índice de vazios e a absorção das argamassas com relação água-cimento constante estão indicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Absorção e índice de vazios para argamassas com a/c constante

Argamassa	Absorção (%)		Índice de vazios (%)	
	28 dias	63 dias	28 dias	63 dias
R	11,0 ^a	10,7 ^{a b}	21,5 ^a	20,8 ^{a b}
2A	11,3 ^a	11,2 ^a	21,8 ^a	21,6 ^a
2B	10,3 ^b	10,6 ^b	20,1 ^b	20,6 ^b
2C	10,0 ^{b c}	10,5 ^b	19,6 ^{b c}	20,5 ^b
2D	9,7 ^c	9,1 ^c	19,3 ^c	18,3 ^c

Nota: Em cada uma das idades a mesma letra indicada junto aos valores mostra que, segundo o teste de Tukey, esses valores não diferem significativamente. Letras diferentes mostram valores significativamente diferentes.

Com a evolução da idade de cura houve diminuição nos valores de absorção total e no índice de vazios, exceto o ocorrido com as argamassas 2B e 2C, entre 28 e 63 dias, que apresentaram aumento da absorção e do índice de vazios. No entanto, as variações apresentadas são numericamente pequenas e podem estar

relacionadas às variações experimentais, uma vez que a tendência de diminuição da absorção e do índice de vazios foi observada.

Para a série de argamassas com a/c constante, os valores indicaram que as argamassas R e 2A não diferem significativamente na absorção e no índice de vazios, o que também ocorre nas argamassas 2B e 2C. A argamassa 2D, com maior percentual de substituição do cimento, foi a que apresentou menores valores de absorção e do índice de vazios nas duas idades ensaiadas e, de acordo com o teste de Tukey, essa argamassa se diferencia das demais de forma significativa, nas duas idades ensaiadas.

A Tabela 11 descreve os resultados para os ensaios da série com a/a (relação água- aglomerante) constante.

Tabela 11 - Absorção e índice de vazios nas argamassas com a/a constante

Argamassa	Absorção (%)			Índice de vazios (%)		
	28 dias	63 dias	91 dias	28 dias	63 dias	91 dias
R	11,0 ^a	10,7 ^a	11,1 ^b	21,5 ^a	20,8 ^a	21,0 ^a
A	12,0 ^{a b}	10,8 ^a	10,9 ^a	21,7 ^a	21,1 ^a	21,0 ^a
B	11,3 ^a	11,1 ^a	10,3	21,9 ^a	21,5 ^a	19,8 ^a
C	11,6 ^a	11,3 ^a	11,4 ^{a b}	22,0 ^a	21,6 ^{a b}	21,8 ^b
D	11,9 ^a	11,5 ^{a b}	10,7 ^a	22,7 ^a	22,2 ^b	20,5 ^a
E	12,2 ^b	11,6 ^b	12,0 ^a	23,1 ^a	22,2 ^b	22,8 ^b

Nota: Em cada uma das idades a mesma letra indicada junto aos valores mostra que, segundo o teste de Tukey, esses valores não diferem significativamente. Letras diferentes mostram valores significativamente diferentes.

As argamassas com relação água-aglomerante constante também apresentaram diminuição na absorção e no índice de vazios com o passar do tempo de cura, mas os resultados indicam aumento destas grandezas entre as idades de 63 e 91 dias para as argamassas R, C e E. Para a idade de 28 dias o teste de Tukey mostrou que não há diferenças significativas no índice de vazios, e a absorção somente diferencia a argamassa E das demais.

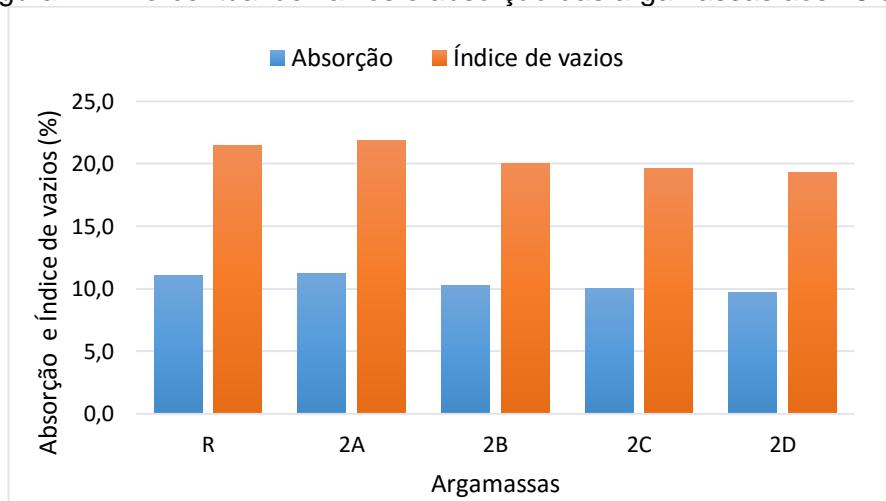
Nas idades de 63 dias e 91 dias, tanto para a absorção quanto para o índice de vazios, as argamassas podem ser separadas em dois grupos que se distinguem significativamente, ainda que as diferenças sejam numericamente pequenas.

Souza *et al* (2010) analisaram as variações no índice de vazios e na absorção nas idades de 7, 28 e 63 dias, em argamassas produzidas com substituição parcial do cimento por vidro, em volume, de 5% e 15%. Os resultados obtidos pelos autores mostraram redução na absorção e no índice de vazios no decorrer do tempo de cura das argamassas, mas segundo os autores as variações nessas grandezas foram pequenas.

Ainda de acordo com Souza *et al* (2010), para ensaios realizados numa mesma idade os resultados indicaram que a absorção e o índice de vazios, na comparação entre a argamassa de referência e as demais argamassas produzidas com o resíduo de vidro, não apresentaram diferenças significativas.

A Figura 21 destaca, para as argamassas com relação água-cimento constante, a correlação entre a diminuição no índice de vazios e uma consequente menor absorção, devido à diminuição na porosidade do material.

Figura 21 - Percentual de vazios e absorção das argamassas aos 28 dias



Fonte: Autor (2015)

A relação entre o índice de vazios e absorção está coerente com o esperado, uma vez que segundo Mehta e Monteiro (2008), os poros de maior dimensão nos materiais cimentícios (poros capilares) influem na permeabilidade do material. Assim, menores valores de absorção estão associados à menores quantidade de vazios na argamassa, uma vez que a permeabilidade de um material está

relacionada à quantidade de vazios nesse material, e ao tamanho desses poros permeáveis.

4.4.6 Massa específica no estado endurecido

Na Tabela 12 estão indicados os valores de massa específica seca e massa específica real, no estado endurecido, para as duas séries de argamassas.

Tabela 12 – Massas específicas das argamassas no estado endurecido

Argamassa	Massa Específica real (kg/m ³)			Massa Específica seca (kg/m ³)		
	28 dias	63 dias	91 dias	28 dias	63 dias	91 dias
R	2490	2465	2411	1954	1952	1904
A	2488	2478	2447	1947	1956	1932
B	2473	2463	2408	1932	1934	1931
C	2445	2449	2443	1906	1920	1911
D	2458	2478	2419	1900	1927	1922
E	2463	2459	2461	1893	1914	1901
2A	2482	2464		1940	1932	
2B	2441	2442		1952	1939	
2C	2438	2461		1960	1956	
2D	2466	2451		1989	2004	

Nota: Valores em destaque em cada idade indicam o maior e menor valor dentre os resultados obtidos

De forma semelhante ao ocorrido com as densidades de massa no estado fresco, a substituição do cimento pelo RLV produz diferenças estatisticamente significantes, segundo o teste de Tukey, entre alguns valores de massa específica. No entanto, os resultados indicaram variação percentualmente pequena na massa específica independentemente da quantidade de RLV usado na fabricação das argamassas.

Tomando-se os valores extremos de massa específica apresentados anteriormente na Tabela 12, em cada uma das idades, a maior diferença obtida entre o máximo e mínimo valor foi de aproximadamente 5%, na idade de 63 dias para a massa específica seca. Dessa forma, a substituição do cimento pelo RLV não promoveu variação numérica relativamente pequena na massa específica da argamassa.

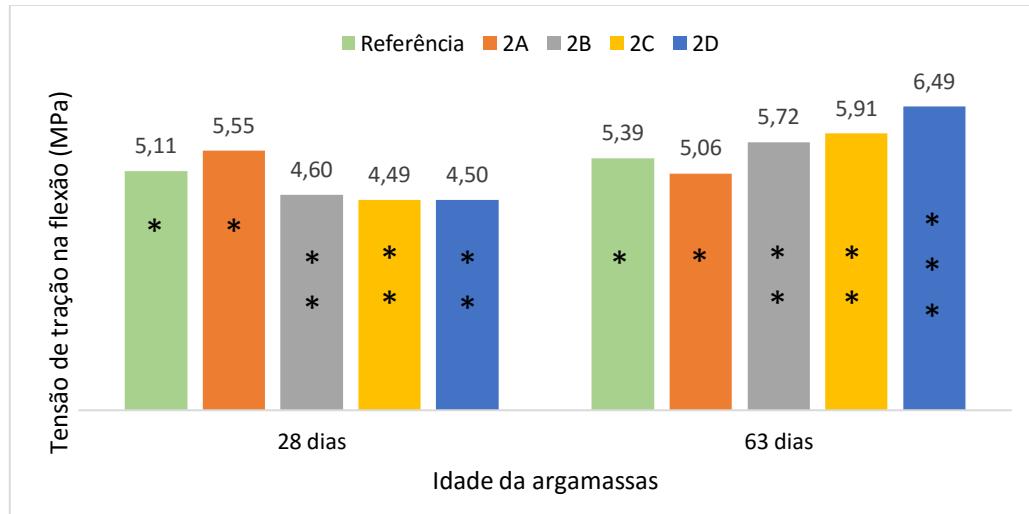
A tendência observada nesse estudo, de pequena variação percentual na massa específica para os diferentes percentuais de RLV na mistura, é uma característica

favorável à aplicação do resíduo, quando se deseja manter aproximadamente constante o valor dessa propriedade.

4.4.7 Resistência à tração na flexão

Os resultados do ensaio de tração na flexão, para as argamassas com a/c constante, estão ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Valores de tensão à tração na flexão para argamassas com relação água-cimento constante



Em cada idade, as barras com mesma marcação * indicam que as argamassas não diferem significativamente segundo o teste de Tukey.

Fonte: Autor (2015)

Na idade de 28 dias, o teste de Tukey indica que as tensões de ruptura das argamassas R (referência) e 2A não são significativamente diferentes. Para essa idade é possível separar as argamassas em dois grupos, segundo sua resistência à tração, nos quais as argamassas 2B, 2C e 2D também podem ser consideradas sem diferença significativa em seus valores de resistência.

Na idade de 63 dias, as argamassas com maiores percentuais de RLV foram as que obtiveram maiores resistências à tração na flexão. O teste de Tukey permitiu distinguir a argamassa 2D como a de maior resistência, agrupou as argamassas 2B, 2C e R sem diferenças significativas entre elas e mostrou ainda que as argamassas R e 2A não se distinguem em suas resistências à tração na flexão, semelhantemente ao ocorrido na idade de 28 dias.

A resistência à tração na flexão está relacionada à forma e rugosidade dos grãos, ao tipo de cimento e idade de cura e à quantidade de vazios presentes no material. Os ensaios discutidos anteriormente mostraram a argamassa 2D com o menor índice de vazios na idade de 63 dias, enquanto as argamassas R e 2A foram as que tiveram maior índice de vazios nessa idade. A menor quantidade de vazios permite o melhor empacotamento do material e melhora seu desempenho com relação à resistência à tração na flexão. Cabe ressaltar que a argamassa 2D foi a que apresentou menor índice de consistência, o que a princípio poderia dificultar a moldagem dos corpos de prova, e gerar aumento na porosidade.

Comparando-se as idades de 28 dias e 63 dias, a argamassa 2D apresentou o maior crescimento em sua resistência, cerca de 44%, enquanto a argamassa de referência apresentou um crescimento de aproximadamente 5% e as argamassas 2B e 2C tiveram crescimento, aproximadamente, de 24% e 32%, respectivamente.

Os resultados obtidos nos estudos de Taha e Nounou (2008) mostram que para concretos produzidos com substituição de 20% do cimento por pó de vidro, os valores de resistência a flexão mostraram-se ligeiramente superiores em relação ao concreto de referência. Quando os autores usaram, de forma combinada, a substituição parcial do cimento por pó de vidro, e da areia por vidro moído, as tensões de flexão nos concretos com as substituições se mostraram maiores ainda quando comparadas aos concretos de referência, e indicam um provável melhor empacotamento da mistura, com diminuição nos vazios.

O aumento da resistência à tração poderia ainda estar associado à presença do RLV, devido às reações entre os compostos hidratados do cimento e a sílica presente no resíduo. Ainda que a resistência à tração seja associada de forma mais direta à quantidade de vazios do material, os índices de vazios nas argamassas tem valores próximos. Assim, as maiores resistências obtidas nas argamassas com maior percentual de resíduo indicaram uma possível influência do resíduo no ganho de resistência devido a ação pozolânica. Cabe ressaltar que os efeitos das reações pozolânicas deveriam ser mais relevantes nas maiores idades, uma vez que o

desenvolvimento dessas reações se dá lentamente entre os compostos hidratados do cimento e a sílica presente nos materiais pozolânicos.

Os resultados do ensaio de ruptura por tração na flexão para as argamassas com a/a constante estão descritos na Tabela 13. Devido a um problema experimental, a argamassa E não foi ensaiada na idade de 28 dias.

Tabela 13 – Ruptura por tração na flexão para argamassas com a/a constante

Argamassa	Tensão de ruptura à flexão (MPa)		
	28 dias	63 dias	91 dias
R	5,11 ^b	5,39 ^a	5,42 ^c
A	4,84 ^b	4,79 ^a	5,13 ^b
B	4,96 ^b	5,09 ^a	5,14 ^{b c}
C	4,51 ^a	4,69 ^a	4,32 ^a
D	4,96 ^b	4,55 ^a	3,99 ^a
E	-----	5,25 ^a	4,61 ^{a b}

Nota: Em cada uma das idades, a mesma letra indicada junto aos valores mostra que, segundo o teste de Tukey, esses valores não diferem significativamente. Letras diferentes mostram valores significativamente diferentes.

Para a idade de 28 dias os resultados permitiram distinguir as argamassas, segundo o teste de Tukey, somente com a argamassa C apresentando diferença significativa das demais. Na idade de 63 dias todas as argamassas se apresentaram, segundo o teste de Tukey, sem diferenças significativas em relação à resistência à tração na flexão. Os valores em vermelho na tabela anterior indicam diminuição na resistência à tração da argamassa com o aumento da idade de ensaio. Tal comportamento se mostrou contrário à tendência de ganho na resistência e pode estar associado às variáveis experimentais.

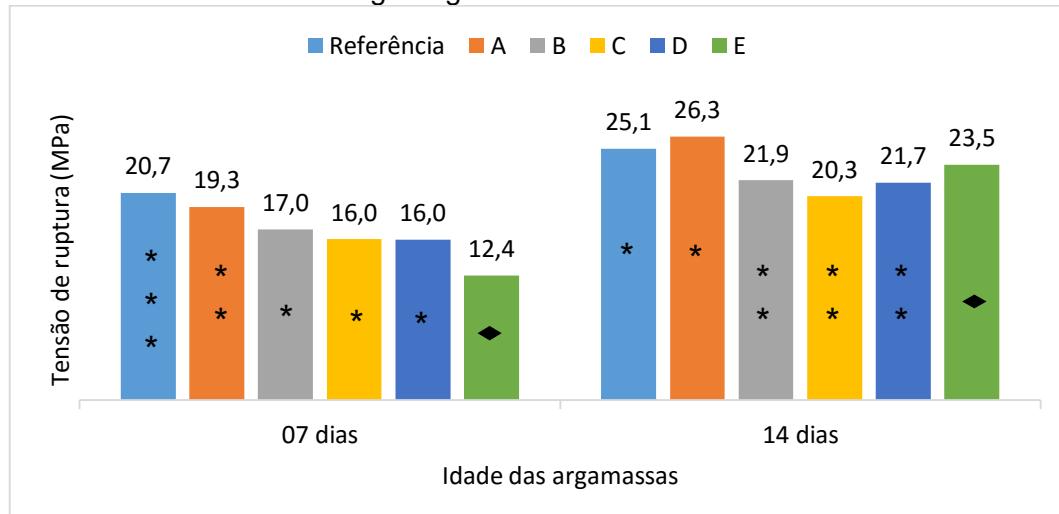
Os valores obtidos para os índices de vazios nesse estudo, e que já foram apresentados anteriormente, se mostraram próximos para todas as argamassas estudadas. A quantidade de vazios está relacionada de forma direta à resistência à tração na flexão. Ainda que os índices de vazios das argamassas sejam semelhantes a resistência à compressão pode ser influenciada pela porosidade da pasta de cimento, devido aos diferentes valores da relação água-cimento nas argamassas.

As argamassas B e C entre as idades de 28 dias e 63 dias apresentaram, respectivamente, aumentos de aproximadamente 3% e 4% nos valores de resistência à tração na flexão. Ao se compararem esses valores com os aumentos de resistência apresentados, entre as mesmas idades de cura, nas argamassas 2B (24%) e 2C (32%) observa-se uma possível influência da relação água-cimento com aumento da porosidade na pasta de cimento nas argamassas B e C e uma consequente redução na resistência à tração na flexão.

4.4.8 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão mostraram que, aos 7 e 14 dias de cura, as argamassas com RLV apresentaram menores resistências quando comparadas à argamassa de referência, como ilustra a Figura 23. Em cada idade de ensaio, os resultados foram comparados e agrupados segundo o teste de Tukey.

Figura 23 - Resistência à compressão aos 7 e 14 dias das argamassas com relação água-aglomerante constante



Nota: Em cada idade, as barras com mesma marcação * ou ◆ indicam que os valores de resistência não diferem significativamente segundo o teste de Tukey.

Fonte: Autor (2015)

Na idade de 7 dias, o teste de Tukey diferencia de forma significativa as argamassas quanto a sua resistência a compressão. Os resultados permitiram que se distinguissem quatro grupos de resistência e colocando a argamassa de referência como o maior valor de resistência mecânica, seguida da argamassa A (15% de RLV). As argamassas B, C e D não apresentaram diferenças significativas

em suas resistências, e a argamassa E que apresenta o maior percentual de resíduo foi a que apresentou menor valor de resistência.

O cimento usado na fabricação das argamassas, CPV, tem um rápido desenvolvimento das reações de hidratação resultando em elevada resistência inicial. Os menores valores de resistência mecânica para as argamassas com substituição parcial do cimento, na idade de 7 dias, podem ser relacionados à menor quantidade de cimento na mistura, uma vez que o resíduo usado em substituição ao cimento, por sua atividade pozolânica, provoca um ganho de resistência mais lento nos compostos. Tal comportamento foi evidenciado pelo menor valor de resistência à compressão obtido pela argamassa E, com maior percentual de substituição do cimento.

A argamassa A, na idade de 14 dias, apresentou um valor de resistência numericamente maior que a argamassa de referência. No entanto, o teste de Tukey mostrou que nessa idade as resistências das argamassas R e A não apresentam diferença significativa entre elas. Na idade de 14 dias diferenciam-se três grupos de resistência, no entanto, os resultados se mostraram semelhantes àqueles obtidos nos ensaios aos 07 dias, pois ainda indicaram a argamassa de referência com a maior resistência e a argamassa E com a menor valor de resistência a compressão.

Os resultados de ruptura à compressão na idade de 28 dias estão apresentados na Tabela 14. Para fins de comparação também estão indicados os resultados dos ensaios nas idades de 7 e 14 dias.

Tabela 14 – Ruptura à compressão para argamassas com a/a constante

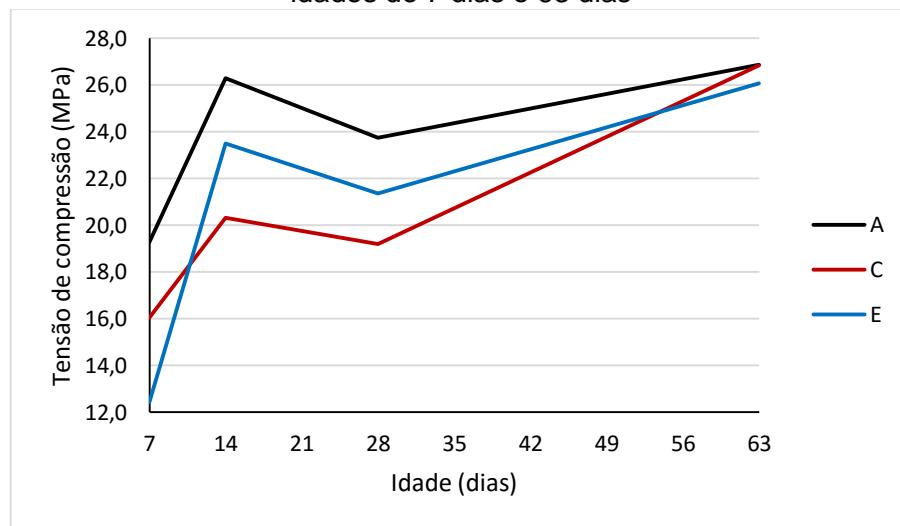
Argamassa	Tensão de ruptura (MPa)		
	07 dias	14 dias	28 dias
Referência	20,7	25,1	23,6
A	19,3	26,3	23,8
B	17,0	21,9	23,2
C	16,0	20,3	19,2
D	16,0	21,7	23,3
E	12,4	23,5	21,4

Na idade de 28 dias as argamassas A, C e D apresentaram valores de resistência mecânica que se mostraram incoerentes com os resultados das idades anteriores, pois mostraram um decréscimo de resistência no decorrer do tempo, como indicam os valores em destaque apresentados anteriormente na Tabela 14.

O comportamento anômalo para as resistências aos 28 dias quando comparadas à idade de 14 dias suscitou ainda um possível problema relacionado ao cimento utilizado. As resistências normais obtidas no ensaio de caracterização do cimento, já descritas anteriormente, mostraram que ele se enquadrou nas especificações da ABNT NBR5733:1991, exceto para a idade de 7 dias, na qual o cimento apresentou resistência de 30,6MPa, abaixo do mínimo indicado em norma, de 34MPa.

No entanto, o cimento utilizado na fabricação de todas as argamassas foi o mesmo e a evolução das resistências ao longo do tempo de cura mostrou que as argamassas A, C e E tiveram ganho de resistência à compressão entre as idades de 28 dias e 63 dias, como ilustra a Figura 24.

Figura 24 - Evolução das resistências a compressão das argamassas A, C e E entre as idades de 7 dias e 63 dias



Fonte: Autor (2015)

Para a idade de 91 dias somente a argamassa A apresentou novamente comportamento anômalo, com diminuição na resistência mecânica em relação ao valor obtido para a idade de 63 dias, como ilustra o valor em destaque na Tabela

15. Os ensaios com as argamassas que apresentaram comportamento anômalo não foram repetidos para avaliação dos possíveis erros experimentais.

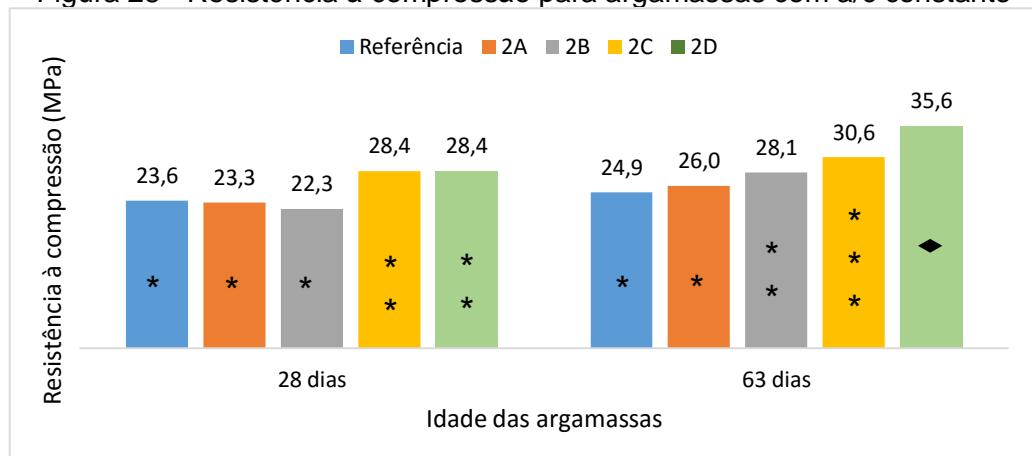
Tabela 15 – Evolução da resistência à compressão para argamassas com a/a constante

Argamassa	Resistência à compressão (MPa) nas idades indicadas				
	07 dias	14 dias	28 dias	63 dias	91 dias
R	20,7	25,1	23,6	24,9	24,9
A	19,3	26,3	23,8	26,9	23,7
B	17,0	21,9	23,2	23,9	25,7
C	16,0	20,3	19,2	26,8	27,1
D	16,0	21,7	23,3	28,9	28,3
E	12,4	23,5	21,4	26,1	27,7

O ganho de resistência no decorrer do período de cura para as argamassas R, B e D com relação água-aglomerante constante se mostrou coerente com o esperado mediante as reações de hidratação do cimento, com consequente ganho de resistência mecânica com o passar do tempo de cura.

As argamassas com relação água-cimento constante se mostraram com evolução da resistência de acordo com o esperado para as idades de 28 e 63 dias. Todas as argamassas dessa série apresentaram ganho de resistência ao longo do tempo, e para aquelas produzidas com maior percentual de resíduo, o ganho de resistência entre 28 e 63 dias foi percentualmente maior, como ilustram os valores da Figura 25.

Figura 25 - Resistência à compressão para argamassas com a/c constante



Nota: Em cada idade, as barras com mesma marcação * ou ↗ indicam que os valores de resistência não diferem significativamente segundo o teste de Tukey.

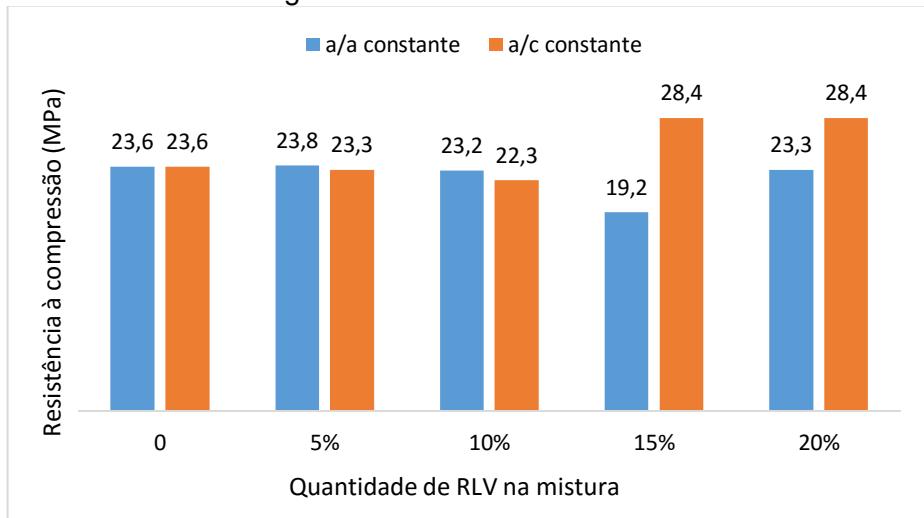
Fonte: Autor (2015)

Os estudos de Paiva *et al* (2010) mostraram que argamassas produzidas com substituição do cimento por pó de vidro, na idade de 7 dias, apresentaram valores de resistência à compressão muito próximos para os diferentes percentuais de substituição, tanto quando comparadas entre eles, quanto em comparação à argamassa de referência, sem vidro. Os resultados nesse estudo diferenciam-se daqueles obtidos por esses autores, uma vez que na idade de 07 dias as argamassas com substituição parcial do cimento apresentaram menores resistências a compressão.

No entanto, com a evolução da idade de cura as argamassas com resíduo de vidro apresentaram ganho de resistência superior àquele demonstrado pela argamassa de referência. Esse comportamento também foi observado por Paiva *et al* (2010) no crescimento da resistência a compressão entre 7 e 28 dias e entre 7 e 56 dias.

Na comparação entre as duas séries de argamassas, para a idade de 28 dias, foi possível verificar que as resistências das argamassas com a/c constante apresentaram valores próximos àqueles obtidos pelas argamassas com a/a constante. Esse comportamento foi observado para os menores percentuais de adição do resíduo, 5% e 10%, enquanto para as argamassas com 15% e 20% de RLV, a série com relação água-cimento constante obteve maiores resistências, como ilustra a Figura 26.

Figura 26 – Comparativo de resistências à compressão para as duas séries de argamassas na idade de 28 dias

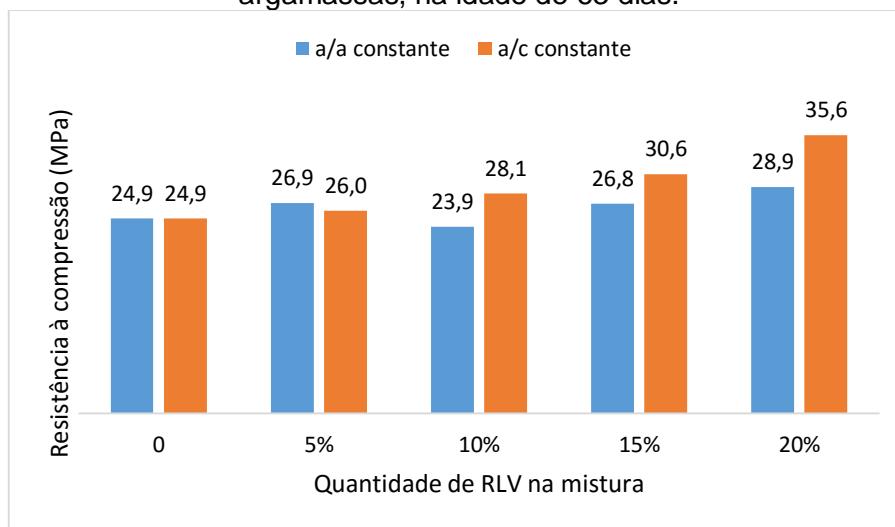


Fonte: Autor (2015)

A argamassa C, com 15% de RLV e relação água-aglomerante constante, apresentou um comportamento inesperado para evolução das resistências entre 14 e 28 dias, com diminuição no valor da tensão de ruptura, o que acentuou as diferenças nas resistências entre as argamassas duas séries de argamassas (a/a constante e a/c constante).

As diferenças entre as resistências das duas séries de argamassas, observadas na idade de 28 dias, se mantiveram semelhantes para a idade de 63 dias, como ilustra a Figura 27.

Figura 27 – Comparativo de resistências à compressão para as duas séries de argamassas, na idade de 63 dias.



Fonte: Autor (2015)

A análise comparativa das argamassas produzidas com 20% de RLV, tanto na idade de 28 dias quanto na idade de 63 dias, mostra que a argamassa 2D apresentou resistência à compressão cerca de 22% maior que a argamassa D, com mesmo percentual de resíduo, mas com relação água-aglomerante constante. Esse comportamento de maiores resistências em uma mesma idade para as argamassas com relação água-cimento constante está atribuído à maior quantidade de água presente nas misturas com relação água-aglomerante constante e, consequentemente, maior porosidade da pasta de cimento e diminuição na resistência mecânica.

A Tabela 16 descreve as relações água-aglomerante e água-cimento para as argamassas desse estudo.

Tabela 16 – Valores de a/a e a/c para as argamassas

Argamassa	Relação água-aglomerante (kg/kg)	Relação água-cimento (kg/kg)
R, 2A, 2B, 2C, 2D	0,620	0,620
A	0,620	0,646
B	0,620	0,675
C	0,620	0,707
D	0,620	0,744
E	0,620	0,785

Os valores da relação água-cimento mostram que a quantidade de água nas misturas com maior percentual de resíduo e relação água-aglomerante constante, é significativamente maior quando comparado à argamassa de referência. A maior quantidade de água influencia diretamente o comportamento mecânico do composto, com maior porosidade na pasta de cimento e diminuição na resistência à compressão.

O comparativo das resistências a compressão nas idades de 28 dias e 63 dias mostrou que em relação a argamassa de referência, as argamassas com RLV apresentaram desempenho muito semelhante, excetuando-se a argamassa C (15% de RLV) na idade de 28 dias. Foi possível ainda verificar que para a idade de 63 dias, as argamassas com 15% e 20% de resíduo obtiveram diferenças mais significativas em relação a argamassa sem resíduo, mesmo com as relações água-cimento 0,707 e 0,744, consideravelmente maiores que o valor 0,620 da argamassa de referência.

Para a resistência à compressão, foi possível verificar que uma substituição de 20% do cimento, mesmo com o aumento da relação água-cimento, produziu uma argamassa com resistência equivalente a argamassa de referência aos 28 dias e com valor superior na idade de 63 dias. A substituição do resíduo possibilitou, em comparação com a argamassa de referência, uma redução de aproximadamente 74 kg de cimento por m³ de argamassa, consumo cerca de 17% menor quando comparado a argamassa de referência.

A argamassa E, com 25% de substituição do cimento, apresentou na idade de 28 dias um valor de resistência à compressão inferior àquele da argamassa de referência, mas nas idades de 63 dias e 91 dias, o desempenho da argamassa E foi superior ao da argamassa sem adição do resíduo de vidro. Em comparação a argamassa de referência, a argamassa E possibilitaria uma redução de 97 kg de cimento por m³ de argamassa, aproximadamente uma diminuição de 22%.

Os resultados desse estudo mostraram que as argamassas com resíduo tendem a apresentar menor resistências nas primeiras idades, mas no decorrer do tempo de cura o desempenho dessas argamassas com resíduo tende a ser superior a argamassa de referência. Tal comportamento também foi observado nos estudos de Calmon *et al* (2014) no qual, em comparação com uma argamassa de referência, na idade de 07 dias a argamassa com resíduo apresentava menor resistência, mas aos 28 dias a resistência era muito próxima à referência e significativamente superior na idade de 270 dias.

4.4.9 Módulo de elasticidade dinâmico

Os valores obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico das argamassas, nas idades de 28, 63 e 91 dias, estão descritos na Tabela 17.

Tabela 17 – Módulo de elasticidade dinâmico para as duas séries de argamassas

Argamassa	Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)		
	28 dias	63 dias	91 dias
R	28,4 b	29,2 c	27,4 a
A	26,8 a	28,9 b c	28,4 b
B	27,3 a	28,9 b	28,7 b c
C	26,9 a	28,8 b	28,9 b c
D	27,4 a	28,8 b	29,2 c
E	-----	28,1 b	27,4 a
2A	27,1 a	27,0 a	----
2B	28,8 b c	29,1 c	----
2C	28,7 b c	30,1 d	----
2D	29,5 c	30,4 d	----

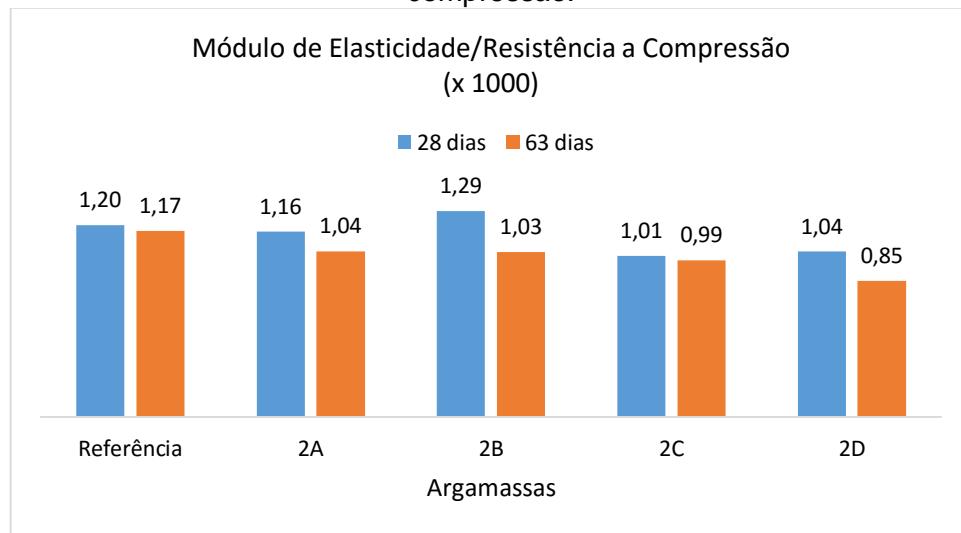
Nota: Segundo o teste de Tukey, para uma mesma idade de ensaio, os valores com mesma letra junto a eles não diferem significativamente

O módulo de elasticidade dinâmico das argamassas apresentou tendência de aumento entre as idades de 28 dias e 63 dias. Nas idades de 28 e 63 dias a argamassa de referência (R) apresentou maior valor de módulo de elasticidade quando comparada às argamassas A, B, C, D e E que tem relação água-aglomerante constante.

As argamassas com relação água-cimento constante obtiveram os maiores valores para o módulo de elasticidade, nas idades de 28 e 63 dias. Em ambas idades as argamassas 2C e 2D apresentaram os maiores valores do módulo de elasticidade, sem diferenças significativas entre elas segundo o teste de Tukey. Os resultados diferem daqueles encontrados por Calmon *et al* (2014), que indicaram menores valores de módulo de elasticidade para as argamassas com resíduo de vidro quando comparadas à argamassa de referência, sem resíduo.

A Figura 28 ilustra, para a série de argamassas com relação água-cimento constante, o valor da razão entre o módulo de elasticidade (GPa) e a resistência a compressão (MPa), nas idades de 28 e 63 dias.

Figura 28 – Relação entre os valores do módulo de elasticidade e da resistência a compressão.



Fonte: Autor (2015)

Todas as argamassas da série com relação água-cimento constante apresentaram acréscimo de resistência à compressão entre as idades de 28 dias e 63 dias, mas os valores do módulo de elasticidade, no mesmo período de tempo, mantiveram-se

aproximadamente constantes ou com aumentos numericamente pequenos. Para uma mesma idade observa-se ainda, para as argamassas com a/c constante, uma tendência de aumento no módulo de elasticidade quando se aumenta o percentual de RLV na mistura.

Os estudos de Paiva *et al* (2010) e Calmon *et al* (2014) mostraram uma correlação entre aumento da resistência à compressão e aumento no módulo de elasticidade. Tal comportamento também se apresentou nesse estudo, no entanto, a razão entre o módulo de elasticidade e a resistência a compressão mostrou que os aumentos nas resistências, percentualmente, tendem a ser maiores que os acréscimos no módulo de elasticidade para cada uma das argamassas.

4.4.10 Reatividade álcali-sílica

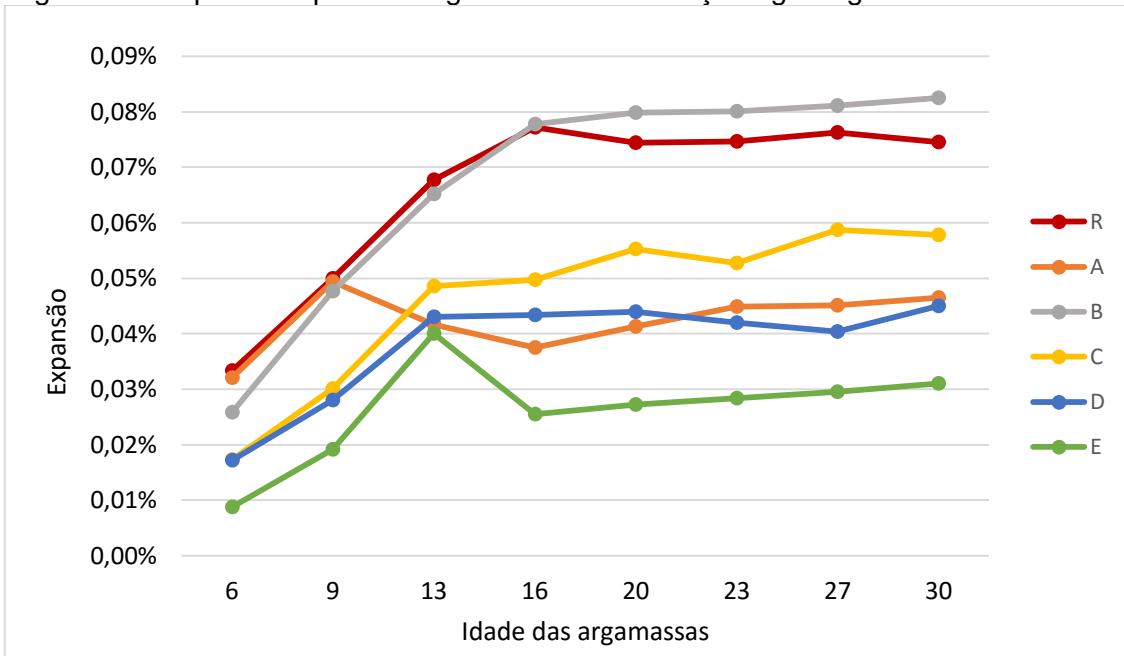
No ensaio para avaliar a expansão na reação álcali-sílica, as barras de argamassa ficaram imersas em solução de hidróxido de sódio, no interior de estufa, até a idade de 30 dias. Nenhuma das barras de argamassa apresentou problemas de fissuração e/ou lascamento por expansão excessiva nesse período.

A avaliação da reatividade do resíduo se deu por comparação entre as expansões nas argamassas com diferente percentuais de RLV e as expansões da argamassa de referência (R), sem a presença do resíduo de vidro na mistura. A série de normas da ABNT NBR15577:2008, nas seis partes, descreve procedimentos para avaliação do potencial reativo de agregados para uso em concreto, em vista da reação álcali-agregado.

As argamassas estudadas não foram produzidas com agregados potencialmente reativos, como indica a ABNT NBR15577-4:2008. A análise das expansões nas argamassas avaliou o possível efeito deletério da substituição do cimento pelo resíduo de vidro. Foram utilizados os limites de expansões máximas indicadas nas ABNT NBRR15577-1:2008 para avaliação do potencial reativo da mistura cimento+RLV.

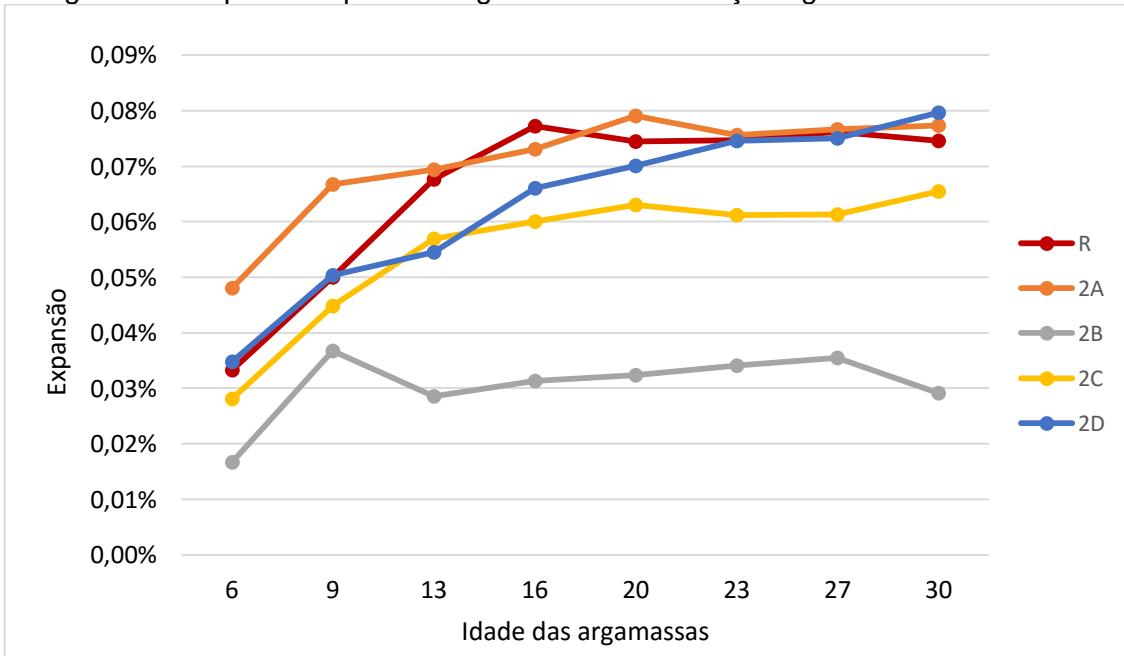
A Figura 29 ilustra as expansões para a série de argamassa com relação água-aglomerante constante, enquanto as expansões para a série de argamassas com relação água-cimento constante podem ser visualizadas na Figura 30.

Figura 29 - Expansões para as argamassas com relação água-aglomerante constante



Fonte: Autor (2015)

Figura 30 - Expansões para as argamassas com relação água-cimento constante



Fonte: Autor (2015)

Todas as argamassas apresentaram expansão na idade de 30 dias inferior a 0,19%, valor indicado na ABNT NBR15577-1:2008 como limitante para que um agregado possa ser considerado inócuo no ensaio acelerado de expansão em barras de argamassa. Ainda segundo essa norma, consideram-se materiais inibidores da reação álcali-sílica o metacaulim e a sílica ativa em combinação com qualquer tipo de cimento Portland, ou ainda, os cimentos do tipo CPII-E, CPIII, CPII-Z e CPIV, desde que sejam atendidos determinados critérios em ensaios de expansão em primas de concreto e/ou mitigação da expansão em barras de argamassa.

Nos ensaios desse estudo, os resultados indicam uma tendência de diminuição nas expansões nas argamassas com RLV, quando comparadas à argamassa de referência (sem resíduo de vidro). Para a série com relação água-aglomerante constante as argamassas D e E, com 20% e 25% de RLV respectivamente, apresentaram as menores expansões. O estudo de Serpa *et al* (2013) indicou que em argamassas com agregados reativos, a substituição do cimento pelo pó de vidro provoca redução nas expansões, e que o percentual de redução aumenta com o acréscimo da quantidade de pó de vidro na argamassa. Os resultados obtidos nesse estudo não permitiram estabelecer uma correlação direta entre o percentual de vidro na mistura, e a diminuição nas expansões, uma vez que para a série com relação água-cimento constante as argamassas 2C e 2D, com os maiores percentuais de resíduo, apresentaram comportamento próximo ao da argamassa de referência.

Resultados obtidos por Shao *et al* (2000), mostraram que a granulometria do pó de vidro influenciou nas expansões em argamassas, e resultaram em menores expansões para vidro de menor granulometria que, de acordo com o autor está relacionado à maior atividade pozolânica do material mais fino. Esse comportamento também foi confirmado por Mirzahosseini e Riding (2015), que verificaram maiores índices de atividade pozolânica para o vidro moído em granulometrias menores. Esses autores obtiveram ainda uma correção linear entre a superfície específica do material, e o grau de hidratação das partículas de vidro usado como material cimentício suplementar.

O potencial de redução das expansões nas argamassas que é produzido pela adição do RLV na mistura, está diretamente ligado à forma e granulometria do material que influenciam em sua atividade pozolânica. A ação do resíduo de vidro na diminuição das expansões pode ser melhor avaliada em argamassas com agregados reativos, onde as expansões apresentam maiores valores, o que pode facilitar a correlação entre as variações nas expansões e a quantidade de RLV na mistura.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

O estudo mostrou ser possível a utilização do resíduo de lapidação do vidro (RLV) como substituto parcial do cimento em argamassas.

As propriedades das argamassas no estudo fresco como densidade de massa, teor de ar incorporado, quando comparados à argamassa de referência, apresentaram pequenas variações numéricas nessas características, independentemente do percentual de RLV usado na mistura.

O índice de consistência foi a propriedade no estado fresco que apresentou a maior variação devido ao uso do RLV, principalmente para as argamassas com relação água-cimento constante. O índice de consistência das argamassas variou de forma inversa à quantidade de resíduo utilizado na mistura.

Para as argamassas no estado endurecido o índice de vazios, a massa específica e o módulo de elasticidade dinâmico apresentaram valores próximos aos da argamassa de referência, em todas as idades avaliadas.

Para as características descritas anteriormente, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, algumas grandezas avaliadas apresentaram valores que, estatisticamente segundo o teste de Tukey, diferem entre eles de forma significativa. No entanto as variações nas grandezas foram numericamente pequenas, e para termos práticos de aplicação das argamassas a tendência de manutenção nas características, a princípio, favorece o uso das argamassas com incorporação do resíduo de vidro.

No ensaio comparativo de resistências para as argamassas, o resíduo de vidro apresentou índice de atividade pozolânica que atende às diretrizes da ABNT NBR12653:2014. A atividade pozolânica do RLV foi confirmada pelo ensaio Chapelle modificado.

As resistências à compressão das argamassas com resíduo, quando comparadas à argamassas de referência, mostraram desempenho superior nas idades de 63 dias e 91 dias, tanto para a série com relação água-cimento constante, quanto para a série com relação água-aglomerante constante.

A substituição de 20% do cimento na argamassa D com relação água-aglomerante constante se mostrou a mais vantajosa em relação à diminuição no consumo de cimento, possibilitando uma redução de 74 kg/m³ de argamassa (cerca de 17%), e manutenção da resistência à compressão, quando comparada à argamassa sem resíduo, e tomando-se como referência a idade de 28 dias.

Na série de argamassas com relação água-cimento constante as resistências a tração na flexão mostraram uma tendência de aumento, entre as idades de 28 dias e 63 dias e que pode ser correlacionada ao acréscimo de resíduo na mistura.

A incorporação do RLV como substituto do cimento em argamassas não mostrou efeitos deletérios na reação álcali-sílica.

Para estudos futuros de uso do RLV sugerem-se os seguintes temas:

- I. investigação da mitigação provocada pelo RLV na expansão em barras de argamassa com agregados reativos;
- II. estudo da composição química do RLV e determinação da possível influência de resquícios dos agentes floculantes nas propriedades das argamassas e/ou concretos produzidos com o RLV;
- III. verificação da influência do RLV na durabilidade dos compostos produzidos frente à carbonatação, ataque por soluções de sulfatos e/ou cloretos;
- IV. análise microestrutural dos compostos produzidos com o resíduo de lapidação do vidro.
- V. estudo da incorporação do RLV em pasta na sua forma *in natura*.

REFERÊNCIAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.** Disponível em <http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto>. Acesso em 20 jul. 15.

ABVIDRO. Benefícios da Reciclagem do Vidro. Disponível em: <http://www.abividro.org.br/reciclagem-abividro/beneficios-da-reciclagem-do-vidro>. Acesso em 23 mai. 15

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

_____. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. ABNT, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. ABNT, Rio de Janeiro, 2001.

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

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

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

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

_____. **NBR 5733:** Cimento Portland de alta resistência inicial – Especificação. ABNT, Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 5752:** Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento – Índice de atividade pozolânica com cimento – Método de ensaio. ABNT, Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7214:** Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2012.

- _____. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. ABNT, Rio de Janeiro, 1996.
- _____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. ABNT, Rio de Janeiro, 2004.
- _____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. ABNT, Rio de Janeiro, 2014.
- _____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da retenção de água. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13280**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. ABNT, Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15630**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação da onda ultra-sônica. ABNT, Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 15895**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado. ABNT, Rio de Janeiro, 2010.

ASTM. **ASTM C230/C230M-08.** Standard specification for flow table for use in tests of hydraulic cement. Philadelphia; 2008.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília – DF, nº 136, 17 jul. 2002, p. 95-96.

CALMON, J. L.; SAUER, A. S.; VIEIRA, G. L.; TEIXEIRA, J. E. S. L. Effects of windshield waste glass on the properties of structural repair mortars. **Cement and Concrete Composites**, n. 53, p. 88-96, 2014.

CARASEK, H. Argamassas. ISAIA, G. C. (ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** v. 2. 1 ed. São Paulo, IBRACON, 2007.

CARSANA, M.; FRASSONI, M.; BERTOLINI, L. Comparison of ground waste glass with other supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, n. 45, 39-45, 2014.

CASTRO, S.; de BRITO, J. Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates. **Journal of Cleaner Production**, n. 41, p. 7-14, 2013.

CEBRACE. Componentes do vidro. Disponível em: <<http://www.cebrace.com.br/v2/vidro/composicao-quimica>>. Acesso em 05 out. 14.

COSTA E SILVA, A. J.; BARBOSA, F. R.; MOTA, J. M. F.; CARVALHO, J. R. Utilização de vidro reciclado para produção de concreto verde em Fernando de Noronha. In **VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis.** Anais. Vitória, Brasil, 2011.

COSTA, J. S.; MARTINS, C. A.; BALDO. J. B. Análise da absorção de água em argamassa com reciclado da indústria cerâmica. In **17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Anais.** Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2006.

DONATELLO, S.; TYRER, M.; CHEESEMAN, C. R. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. **Cement and Concrete Composites**, n. 32, p. 121-127, 2010.

EVANGELISTA, A. C. J.; ALMEIDA, V. C.; CORDEIRO, A. C.; ALVES, L. S.; RODRIGUES, Raquel dos Anjos. Aplicação do resíduo cerâmico como adição mineral na produção de argamassas e concretos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. n. 3. NISAM/ICTR. São Paulo, 2005.

- FALCÃO BAUER, L. A.; AZEVEDO NORONHA, M. A.; FALCÃO BAUER, R. J. Uso de Aditivos no Concreto. FALCÃO BAUER, L. A. (coord). **Materiais de Construção**. v. 1. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2005.
- FRAGATA, A.; VEIGA, M. R.; VELOSA, A. L.; FERREIRA, V. M. Incorporação de resíduos de vidro em argamassas de revestimento – avaliação da sua influência nas características da argamassa. In **2º Nacional de Argamassas de Construção**. Lisboa, 2007.
- GONÇALVES, J. P.; MOURA, W. A.; DAL MOLIN, D. C. M. Avaliação da Influência da utilização do resíduo do corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, v. 2, n. 1, p. 53-68, Porto Alegre, 2002.
- IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, n. 24, p. 1309-1312, 2010.
- JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.
- KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass. **Construction and Building Materials**, n. 28, p. 680-686, 2012.
- KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. **Construction and Building Materials**, n. 44, p. 74-80, 2013.
- KIM, J.; YI, C.; ZI, G. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. **Construction and Building Materials**, n. 75, p. 242-246, 2015.
- LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; FOTIADOU, S. Performance of granulated foam glass concrete. **Construction and Building Materials**, n. 28, p. 759-768, 2012.
- LINTZ, R. C.; PIMENTEL, L. L.; MOTA, A. Estudo do comportamento de blocos de concreto com resíduos de construção e demolição. In **XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Anais. Fortaleza, 2008.
- LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, n. 41, p. 1244-1256, 2011.

MANDANDOUST, R.; GHAVIDEL, R. Mechanical properties of concrete containing waste glass powder and rice husk ash. **Biosystems Engineering**, n. 116, p. 113-119, 2013.

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

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIRZAHOSEINI M.; RIDING K. A. Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder. **Cement and Concrete Research**, n. 58, p. 103-111, 2014.

MIRZAHOSEINI M.; RIDING K. A. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). **Cement and Concrete Composites**, n. 56, p. 95-105, 2015.

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

NUNES, S; MATOS, A. M.; DUARTE, T.; FIGUEIRAS, H.; SOUSA-COUTINHO, J. Mixture design of self-compacting glass mortar. **Cement & Concrete Composites**, n. 43, p. 1-11, 2013.

OLIVEIRA, H. M. Cimento Portland. FALCÃO BAUER, L. A. (coord). **Materiais de Construção**. v. 1. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2005.

ÖZKAN, Ö.; YÜKSEL, I. Studies on mortars containing waste bottle glass and industrial by-products. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 1288-1298, 2008.

PAIVA, O. A.; CORDEIRO, G. C.; ROCHA, F. S.; BUÁS DE LIMA, S. P.; VASCONCELOS, R. P.; TOLEDO FILHO, R. D. Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento Portland. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 2010.

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

PEREIRA DE OLIVEIRA, L. A.; CASTRO GOMES, J. P.; FAZENDA, L. M. O. Análise da Influência de Resíduos Potencialmente Reativos nas Propriedades de Argamassas de Construção. In **3º Congresso Português de Argamassas de**

Construção. Lisboa, 2010. Disponível em www.apfac.pt/congresso2010. Acesso em 05 jun. 2015.

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 componentes. **Construction and Building Materials**, n. 31, p. 197–203, 2012.

PONTES, J.; SILVA, A. S.; FARIA, P. Contributos para a melhoria da durabilidade e sustentabilidade de argamassas e betões – Avaliação da reatividade de pozolanas artificiais. In Congresso Construção. **Anais**. Coimbra, Portugal, 2012.

RAMOS, T.; MATOS, A. M.; ARAÚJO, F.; SOUSA-COUTINHO, J. S. Resíduos de Vidro - A pozolana do futuro para betão estrutural ecológico. **Materiais de Construção**. Porto, n. 163, p. 30-38, 2013.

ROCHA, J. C.; CHERIAF, M. Aproveitamento de resíduos da construção na construção. In: ROCHA, Janaíde Costa; JHON, Vanderley M. (Ed.) **Utilização de resíduos na construção habitacional**. Porto Alegre, Coleção Habitare, v. 4, 2003.

SAFIUDDIN, M.; JUMAAT, M. Z.; SALAM, M. A.; ISLAM M. S.; HASHIM, R. Utilization of solid wastes in construction materials. **International Journal of the Physical Sciences**, v.5, pp. 1952-1963, 18 out., 2010.

SALOMÃO, M. C. F.; DIAS, J. F.; MARTINS, J. A. L. G.; SILVA, T. J. Estudo sobre utilização de resíduo de vidro em argamassas cimentícias. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 2010.

SCHWARZ, N.; CAM, H.; NEITHALATH, N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. **Cement and Concrete Composites**, n. 30, p. 486-496, 2008.

SERPA, D.; SANTOS SILVA, A.; de BRITO, J.; PONTES, J.; SOARES, D. ASR of mortars containing glass. **Construction and Building Materials**, n. 47, p. 489-495, 2013.

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

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

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

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

SICHIERI, E. P.; CARAM, R.; dos SANTOS, J. C. P. Vidros na construção civil. ISAIA, G. C. (ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. v. 2. 1ed. São Paulo, IBRACON, 2007.

SIMÕES, L. J.; SAUER, A. S.; TRISTÃO, F. A.; CALMON, J. L.; VIEIRA, G. L. Caracterização do resíduo de vidro laminado de parabrisas para utilização como substituto parcial do cimento em matrizes cimentícias. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.22, p.43-49, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. Relatório anual da produção de cimento no Brasil - 2013. Disponível em <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>. Acesso em 26 jul. 15.

SOUSA NETO, L. M.; VASCONCELOS, R. P. Utilização do resíduo de vidro moído como adição mineral em matriz cimentícia com relação à atividade pozolânica e à reação álcali-agregado. **56º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 2014.

SOUZA, J. M.; MILANI A. P. S.; BERTOCINI, S. R. RONDON, O. C. Potencialidade do uso do pó de vidro na confecção de argamassa. **52º Congresso Brasileiro do Concreto**. São Paulo, IBRACON, 2010.

TAHA, B.; NOUNU, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. **Construction and Building Materials**, n. 22, p. 713–720, 2008.

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

TUAN, B. L.; HWANG, C. L.; LIN, K. L.; CHEN, Y. Y.; PEI, M. Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. **Construction and Building Materials**, n. 47, p. 334-339, 2013.

YUKSEL, C.; AHARI, R. S.; AHARI, B. A.; RAMYAR. K. Evaluation of three test methods for determining the alkali–silica reactivity of glass aggregate. **Cement & Concrete Composites**, n. 38, p. 57-64, 2013.