



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO
UTILIZADO COMO AGREGADO MIÚDO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

ISABELLE VASCONCELOS ROLLIM

Recife - PE

2019

ISABELLE VASCONCELOS ROLLIM

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO
UTILIZADO COMO AGREGADO MIÚDO NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos de avaliação necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia da Construção

Orientadora: Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro

Coorientador: Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva

Recife - PE

26 de novembro de 2019

R753a Rollim, Isabelle Vasconcelos
Avaliação da influência do resíduo de vidro utilizado como agregado miúdo nas propriedades do concreto / Isabelle Vasconcelos Rollim, 2019.
134 f. : il.

Orientador: Eliana Cristina Barreto Monteiro
Coorientador: Angelo Just da Costa e Silva
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2019.

1. Construção civil. 2. Sustentabilidade. 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

CDU 69

Catarina Duarte - CRB 4/463

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO UTILIZADO COMO AGREGADO MIÚDO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

ISABELLE VASCONCELOS ROLLIM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos de avaliação necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Banca Examinadora:

Orientadora:

Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro
Universidade Católica de Pernambuco

Coorientador:

Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva
Universidade Católica de Pernambuco

Examinadores:

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira
Universidade Católica de Pernambuco

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota
Instituto Federal de Pernambuco

Recife - PE

26 de novembro de 2019

*À Deus e à Virgem Mãe Maria Santíssima.
À minha mãe que em todos os momentos me incentivou
a nunca desistir dos meus sonhos e por me ensinar a
amar e confiar em Deus sobre todas as coisas.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser tão bom e justo, pelos dons que me deu e por mostrar que sou protegida, guiada e iluminada pela sua presença divina. A Maria Santíssima que sempre esteve a passar na frente em toda essa caminhada para a realização do mestrado. À minha mãe Agueda Rosa, pelo eterno orgulho e inspiração, pelo apoio, compreensão, ajuda, amor, e, em especial, por todo carinho ao longo deste percurso.

Ao meu namorado, amigo e colega de trabalho Tony Domingos, pelo amor, paciência, companheirismo, compreensão e por todo suporte que me deu para o ingresso e conclusão do mestrado. Aos meus amigos do Movimento dos Focolares, pela participação intensa e experiências tão belas vividas em unidade. Aos laboratoristas e amigos Gleizer Silva e Washington Esposito por todos os ensinamentos e auxílio na execução dos ensaios em laboratório, e principalmente pelo carinho e amizade construída.

Aos meus colegas de curso, em especial Isaque Lira, José Cláudio Santos, Vanessa Teles, Jéssica Marins, Luiz Dutra, Nicole Nascimento, Douglas Alencar, Guilherme Pereira, Manuéli Santos, Ellany Amorim e Aldileide Mendes, pela cumplicidade, ajuda, amizade e pelos momentos de estudo e brincadeiras ao longo do curso. Ao professor Ângelo Just, pelo acompanhamento e orientação desse trabalho, e por estar sempre disposto à contribuir para o crescimento de seus alunos. À professora Eliana Monteiro pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão desta dissertação, por acreditar na minha capacidade e por seu jeito meigo e espetacular de dar aula e passar conhecimento.

E a todos os meus professores durante o curso de Mestrado em Engenharia Civil, em especial ao professor Romilde Oliveira, na qual devo eterno agradecimento pelo meu ingresso no mestrado, e aos professores Joaquim Oliveira e Fernando Artur, que foram tão importantes no desenvolvimento desta dissertação.

Obrigada meu Deus, o Senhor faz tudo certo!

“...se tentares viver de amor, perceberás que, aqui na terra, convém fazeres a tua parte. A outra, não sabes nunca se virá, e não é necessário que venha. Por vezes, ficarás desiludido, porém jamais perderás a coragem, se te convenceres de que, no amor, o que vale é amar...” (Chiara Lubich)

RESUMO

ROLLIM, Isabelle Vasconcelos. **Avaliação da influência do resíduo de vidro utilizado como agregado miúdo nas propriedades do concreto.** 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife - PE, 2019.

Uma das alternativas para amenizar os impactos causados pela extração dos recursos minerais, e que vem sendo estudado pelo setor da construção civil, é a utilização de resíduos oriundos de processos de reciclagem na produção de compósitos cimentícios. Estudos recentes têm mostrado que o resíduo de vidro pode ser usado na fabricação de compósitos cimentícios, quer como agregado miúdo e graúdo, ou como substituto parcial do cimento. A utilização de agregados de vidro reciclados proporciona como vantagem a redução do consumo do agregado natural e incentiva a destinação adequada desses resíduos. Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a influência da utilização do resíduo de vidro como substituto parcial do agregado miúdo natural (areia) nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto. A metodologia consistiu na realização de ensaios laboratoriais em corpos de prova cilíndricos de concreto e barras de argamassas nos percentuais de substituição 0%, 15% e 30% da areia pelo resíduo de vidro, nas idades de 7, 28 e 148 dias. As propriedades foram analisadas por meio dos ensaios de consistência, massa específica, resistência à compressão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico, absorção de água e expansibilidade das barras de argamassa. Como resultado, observou-se redução da trabalhabilidade para os concretos com 30%, uma redução na resistência mecânica, e os resultados de massa específica e absorção de água não tiveram diferenças significativas. Aos 28 dias de idade, o concreto de referência obteve resistência à compressão de 24,98 MPa, e as amostras com 15% e 30% de substituição apresentaram reduções de 5% e 15%. Quanto a expansibilidade da RAA, os concretos com resíduo de vidro foram classificados como potencialmente reativos, devendo ser tomados cuidados específicos para a mitigação de uma possível expansão da RAA. Concluiu-se que os resultados apontam para a viabilidade técnica da utilização do resíduo de vidro como agregado miúdo na produção de concretos não estruturais, apresentando dessa forma uma alternativa para a redução da extração de recursos naturais e também uma solução ambiental para o descarte e reutilização do resíduo de vidro no setor da construção civil.

Palavras-chave: Resíduos. Agregado reciclado. Reação álcali-agregado. Desenvolvimento Sustentável. Construção Sustentável.

ABSTRACT

ROLLIM, Isabelle Vasconcelos. **The evaluation of the influence on concrete properties of glass waste used as fine aggregate**. 134p. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Universidade Católica de Pernambuco, Recife - PE, 2019.

One of the alternatives to mitigate the impacts caused by the extraction of mineral resources, and which has been studied by the civil construction sector, is the use of waste from recycling processes in the production of cementitious composites. Recent studies have shown that glass waste can be used in the manufacture of cementitious composites, either as fine and coarse aggregate or as a partial substitute for cement. The use of recycled glass aggregates provides the advantage of reducing the consumption of natural aggregates and encourages the proper disposal of these wastes. The main objective of this research is to evaluate the influence of the use of glass waste as a partial substitute for the natural fine aggregate (sand) on the physical, mechanical and durability properties of concrete. The methodology consisted of performing laboratory tests on cylindrical concrete specimens and mortar bars in the percentages of substitution of 0%, 15% and 30% of the sand by the glass waste, at ages of 7, 28 and 148 days. The properties were analyzed through tests of consistency, specific mass, compressive strength, tensile strength by diametrical compression, dynamic modulus of elasticity, water absorption and expansibility of the mortar bars. As a result, there was a 30% reduction in workability for concretes and a reduction in mechanical strength, and the results of specific mass and water absorption had no significant differences. At 28 days of age, the reference concrete obtained compressive strength of 24.98 MPa, and the samples with 15% and 30% of replacement showed reductions of 5% and 15%. Considering the expansion of AAR, the concrete with glass residue was classified as potentially reactive, and specific care should be taken to mitigate a possible expansion of AAR. It was concluded that the results point to the technical feasibility of using glass waste as a fine aggregate in the production of non-structural concrete, thus presenting an alternative for reducing the extraction of natural resources and also an environmental solution for the disposal and reuse of glass waste in the civil construction sector.

Keywords: Waste. Recycled aggregate. Alkali-aggregate reaction. Sustainable development. Sustainable Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação do <i>slump</i> em diferentes níveis de substituição	32
Figura 2 - Tendência das médias do abatimento do concreto em.....	33
Figura 3 - Tendências da resistência à compressão aos 28 dias	36
Figura 4 - Resultados de resistência à compressão	37
Figura 5 - Influência do teor de vidro e da relação a/c	38
Figura 6 - Variação da resistência à compressão.....	39
Figura 7 - Efeito da interação entre os fatores idade e	41
Figura 8 - Variação do módulo de elasticidade	42
Figura 9 - Tendência da absorção de água por imersão e do índice de vazios dos concretos ..	43
Figura 10 - Correlação entre a absorção de água.....	43
Figura 11 - Resultados de baixa expansão da RAA	45
Figura 12 - Programa de teste e minimização da expansão da RAA	46
Figura 13 - Expansão da RAA na substituição da areia pelo RV	46
Figura 14 - Expansão da RAA na substituição.....	47
Figura 15 - Programa Experimental	55
Figura 16 - Separação dos resíduos de vidro graúdos (a) e miúdos (b).....	59
Figura 17 - Sequência de inserção dos materiais na betoneira	62
Figura 18 - Mistura do concreto na betoneira.....	62
Figura 19 - Adensamento mecânico.....	59
Figura 20 - Corpos de prova moldados	63
Figura 21 - Corpos de prova na cura úmida.....	59
Figura 22 - CP's em solução de cal.....	63
Figura 23 - Preparação na argamassadeira.....	61
Figura 24 - Moldagem das barras.....	65
Figura 25 - Execução do ensaio de consistência do concreto.....	66
Figura 26 - Ensaio de compressão axial (antes e depois da ruptura).....	68
Figura 27 - Ensaio de tração por compressão diametral.....	69
Figura 28 - Ensaio de Ultra-som	70
Figura 29 - Ebulição dos CP's em autoclave	72
Figura 30 - Secagem em estufa dos CP's.....	73
Figura 31 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	74
Figura 32 - Distribuição de água no interior dos CP's.....	74

Figura 33 - Barras de argamassa imersas em solução de NaOH.....	75
Figura 34 - Comparador de mudança de comprimento	76
Figura 35 - Esquema do ensaio de RAA pelo método acelerado das barras de argamassa.....	76
Figura 36 - Curva granulométrica da areia utilizada	78
Figura 37 - Curva granulométrica da brita utilizada.....	79
Figura 38 - Brita separada por tamanho	79
Figura 39 - Curva granulométrica do resíduo de vidro utilizado	81
Figura 40 - Curvas granulométricas da areia e do resíduo de vidro utilizados	82
Figura 41 - Separação por tamanho das partículas de areia e RV	82
Figura 42 - Abatimento do concreto das famílias REF, RV 15 e RV 30, respectivamente	83
Figura 43 - Massa específica do concreto no estado fresco e endurecido.....	85
Figura 44 - Resistência média à compressão axial aos 7 e 28 dias	87
Figura 45 - Evolução da resistência à compressão das famílias dos 7 aos 28 dias	89
Figura 46 - Resistência média à tração por compressão diametral aos 7, 28 e 148 dias.....	92
Figura 47 - Efeito da interação entre a idade e o percentual de substituição	93
Figura 48 - Evolução do módulo de elasticidade das famílias dos 7 aos 28 dias.....	96
Figura 49 - Gráfico com as médias de absorção por imersão e índice de vazios	98
Figura 50 - Correlação entre o índice de vazios e a absorção de água	98
Figura 51 - Gráfico com as médias de absorção por capilaridade após 72 horas.....	100
Figura 52 - Gráfico da expansão média com o limite da NBR 15577-1 (2018).....	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis adotadas pelos autores para a confecção dos concretos.....	29
Tabela 2 - Variáveis de produção para análise da influência na RAA.....	44
Tabela 3 - Caracterização física e mecânica do cimento.....	57
Tabela 4 - Caracterização química do cimento.....	57
Tabela 5 - Definição das famílias e quantidade de corpos de prova.....	60
Tabela 6 - Quantitativo de materiais utilizados.....	61
Tabela 7 - Consumo dos materiais utilizados.....	61
Tabela 8 - Idade dos ensaios e quantidade de corpos de prova.....	64
Tabela 9 - Quantitativo de material das barras de argamassa.....	65
Tabela 10 - Granulometria requerida de material para o ensaio.....	65
Tabela 11 - Granulometria da areia utilizada.....	77
Tabela 12 - Granulometria da brita utilizada.....	78
Tabela 13 - Caracterização dos agregados convencionais.....	80
Tabela 14 - Granulometria do resíduo de vidro utilizado.....	80
Tabela 15 - Caracterização do agregado de resíduo de vidro.....	81
Tabela 16 - Resultados do índice de consistência.....	83
Tabela 17 - Massa Específica do concreto fresco.....	84
Tabela 18 - Massa Específica do concreto endurecido.....	85
Tabela 19 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	86
Tabela 20 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	86
Tabela 21 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	88
Tabela 22 - Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	88
Tabela 23 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 7 dias de idade.....	88
Tabela 24 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 28 dias de idade.....	89
Tabela 25 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração aos 7 dias.....	91
Tabela 26 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração aos 28 dias.....	91
Tabela 27 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração aos 148 dias.....	91
Tabela 28 - Dados do ensaio de ultra-som aos 7 dias.....	94

Tabela 29 - Dados do ensaio de ultra-som aos 28 dias.....	94
Tabela 30 - Análise estatística dos resultados do módulo de elasticidade aos 7 dias.....	95
Tabela 31 - Análise estatística dos resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias.....	95
Tabela 32 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade.....	96
Tabela 33 - Análise estatística da absorção por imersão e do índice de vazios	97
Tabela 34 - Análise estatística da absorção por capilaridade as 72 horas	99
Tabela 35 - Expansão média das barras de argamassa	101
Tabela 36 - Análise estatística dos resultados de expansão aos 30 dias.....	102
Tabela 37 - Principais resultados das propriedades físicas.....	105
Tabela 38 - Principais resultados das propriedades mecânicas e de durabilidade.....	105
Tabela 39 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias.....	119
Tabela 40 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias	119
Tabela 41 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 7 dias de idade com o DMS.	119
Tabela 42 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias.....	120
Tabela 43 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias	120
Tabela 44 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 28 dias de idade com o DMS.	120
Tabela 45 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias.....	121
Tabela 46 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração aos 7 dias	121
Tabela 47 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à tração entre as famílias aos 7 dias de idade com o DMS	121
Tabela 48 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias.....	122
Tabela 49 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração aos 28 dias	122
Tabela 50 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à tração entre as famílias aos 28 dias de idade com o DMS	122
Tabela 51 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 148 dias.....	123

Tabela 52 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração aos 148 dias	123
Tabela 53 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à tração entre as famílias aos 148 dias de idade com o DMS	123
Tabela 54 - Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 7 dias ...	124
Tabela 55 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade aos 7 dias.....	124
Tabela 56 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de módulo de elasticidade aos 7 dias de idade com o DMS	124
Tabela 57 - Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias .	125
Tabela 58 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias.....	125
Tabela 59 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias de idade com o DMS	125
Tabela 60 - Detalhamento dos resultados de absorção de água por imersão	127
Tabela 61 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de absorção de água por imersão	127
Tabela 62 - Detalhamento dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	128
Tabela 63 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	128
Tabela 64 - Resultados do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado - família REF.....	130
Tabela 65 - Resultados do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado - família RV15.....	131
Tabela 66 - Resultados do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado - família RV30.....	132

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pesquisas com resíduos de vidro na composição de concretos - continua.....	25
Quadro 2 - Influência do resíduo de vidro na resistência à compressão dos concretos - continua	39
Quadro 3 - Resumo dos resultados de expansão da RAA em diversas pesquisas.....	48
Quadro 4 - Resumo dos principais resultados das pesquisas analisadas	50
Quadro 5 - Resumo dos estudos citados - continua.....	51
Quadro 6 - Variáveis do Programa	54
Quadro 7 - Ensaio para caracterização do agregado miúdo.....	58
Quadro 8 - Ensaio para caracterização do agregado graúdo	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIVIDRO	Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AMBT	Método acelerado das barras de argamassa
ANOVA	Análise de variância
ASTM	American society for testing and materials
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CBCS	Conselho Brasileiro de Construção Sustentável
CMMAD	Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
COMPESA	Companhia Pernambucana de Saneamento
COV	Coefficiente de variação
CP	Corpo de prova
CPT	Método de prismas de concreto
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
DRX	Difração de raio X
fc	Resistência à compressão
fck	Resistência característica do concreto à compressão
FRX	Eflorescência de raio X
GPa	Gigapascal
LQGI	Laboratório de Química Geral e Inorgânica
LTM	Laboratório de Tecnologia de Materiais
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Megapascal
NBR	Norma brasileira regulamentada
ONU	Organização das Nações Unidas
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PE	Pernambuco
PF	Perda ao fogo
RAA	Reação álcali-agregado
RAS	Reação álcali-sílica
REF	Concreto Referência
RI	Resíduo insolúvel
RMR	Região metropolitana do Recife
RV	Resíduo de Vidro
RV15	Concreto com substituição de 15% da areia pelo resíduo de vidro
RV30	Concreto com substituição de 30% da areia pelo resíduo de vidro
UNEP	United Nations Environment Programme
UNICAP	Universidade Católica de Pernambuco
UTRS	Usina de Tratamento de Resíduos Sólidos
WCED	World Commission on Environment and Development

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	23
2	APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	24
2.1	VARIÁVEIS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	27
2.2	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS ANALISADOS	30
2.2.1	Propriedades Físicas do Concreto	30
2.2.1.1	<i>Consistência</i>	31
2.2.1.2	<i>Massa específica</i>	33
2.2.2	Propriedades Mecânicas do Concreto	34
2.2.2.1	<i>Resistência à Compressão</i>	35
2.2.2.2	<i>Resistência à Tração por Compressão Diametral</i>	40
2.2.2.3	<i>Módulo de Elasticidade</i>	41
2.2.3	Propriedades de Durabilidade do Concreto	42
2.2.3.1	<i>Absorção de Água</i>	42
2.2.3.2	<i>Análise da Reação Álcali-Agregado</i>	44
2.2.4	Resumo das Conclusões Relatadas na Literatura	51
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	54
3.1	VARIÁVEIS DO PROGRAMA	54
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	55
3.3	ETAPA 01 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	56
3.3.1	Cimento	56
3.3.2	Agregados Convencionais	57
3.3.3	Água e Hidróxido de Sódio	58
3.3.4	Resíduo de Vidro Moído	59
3.4	ETAPA 02 - DOSAGEM, PRODUÇÃO E MOLDAGEM DOS CP'S	60
3.4.1	Dosagem dos Cilindros de Concreto	60
3.4.2	Confecção dos Cilindros de Concreto	62

3.4.3	Dosagem e Confeção das Barras de Argamassa	64
3.5	ETAPA 03 - ENSAIOS NO CONCRETO	66
3.5.1	Propriedades Físicas do Concreto.....	66
3.5.2	Propriedades Mecânicas do Concreto	67
3.5.2.1	<i>Ensaio de Resistência à Compressão Axial.....</i>	<i>63</i>
3.5.2.2	<i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.....</i>	<i>64</i>
3.5.2.3	<i>Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico por Ultra-Som.....</i>	<i>65</i>
3.5.3	Propriedades Relacionadas a Durabilidade.....	71
3.5.3.1	<i>Ensaio de Absorção de Água por Imersão.....</i>	<i>67</i>
3.5.3.2	<i>Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade.....</i>	<i>69</i>
3.5.3.3	<i>Ensaio de Expansibilidade de Barras de Argamassa.....</i>	<i>70</i>
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS	77
4.1.1	Agregados Convencionais	77
4.1.2	Agregados de Resíduo de Vidro	80
4.2	PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO.....	83
4.2.1	Índice de Consistência	83
4.2.2	Massa Específica	84
4.3	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO	86
4.3.1	Resistência à Compressão Axial.....	86
4.3.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral	90
4.3.3	Módulo de Elasticidade Dinâmico	93
4.4	PROPRIEDADE DE DURABILIDADE DO CONCRETO.....	97
4.4.1	Absorção de água por imersão	97
4.4.2	Absorção de água por capilaridade	99
4.4.3	Expansibilidade de barras de argamassa	100
4.5	AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	105
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
5.1	CONCLUSÕES	107
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
	REFERÊNCIAS	111

APÊNDICE A - Detalhamento e análise estatística dos resultados das propriedades mecânicas do concreto.....	119
APÊNDICE B - Detalhamento e análise estatística dos resultados de absorção de água.....	127
APÊNDICE C - Detalhamento dos resultados de expansibilidade de barras de argamassa.....	130
ANEXO A - Boletim de ensaios de cimento.....	134

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho proporciona um estudo experimental sobre a utilização de resíduos de vidro na composição do concreto, como forma de reaproveitamento desses resíduos na construção civil. Este capítulo expõe uma contextualização do tema, bem como sua justificativa, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Questões como aquecimento global, desertificação, derretimento das calotas polares, excesso de resíduos sólidos, escassez de recursos naturais, enchentes e poluição do solo, da água e do ar estão sempre em pauta atualmente. Assim, é importante pensar e direcionar as construções civis para que se tornem cada vez mais sustentáveis e que sejam capazes de minimizar estes impactos ao meio ambiente.

Uma das primeiras ações com a preocupação de conscientizar a população do cuidado para com o meio ambiente foi a criação do Clube de Roma em abril de 1968. A partir desse ato vários outros ocorreram no decorrer dos anos, mas foi em 1987 que o conceito de “Desenvolvimento Sustentável” foi consolidado pelo relatório da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) conhecido como Relatório de Brundtland ou Nosso Futuro Comum. Foi estabelecida a ideia de que Desenvolvimento Sustentável trata-se da "capacidade de suprir as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas próprias necessidades." (WCED, 1987)

Desde que esse conceito foi estabelecido, outras diversas conferências e encontros promovidos para o bem do Desenvolvimento Sustentável ocorreram ao longo do tempo, tal como a ECO-92, o Protocolo de Quioto, a Rio + 10 e a Rio + 20, entre outras ações (NASCIMENTO, 2012). A mais recente aconteceu em setembro de 2015, onde líderes mundiais reuniram-se na sede da Organização das Nações Unidas (ONU), em Nova York, para elaborar a Agenda 2030 em prol do Desenvolvimento Sustentável, a qual contém o conjunto de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) com meta de serem alcançados até o ano de 2030 (ONU, 2015).

O modelo de Desenvolvimento Sustentável deve estimular e preservar a convivência harmoniosa e o equilíbrio entre as dimensões ambiental, social e econômica (MATEUS,

2009). No entanto para esta dissertação foi dado enfoque maior para as questões ambientais, devido às limitações do programa experimental e do tempo disponível as demais dimensões não puderam ser abrangidas neste trabalho.

Quando se tenta relacionar desenvolvimento sustentável e construção civil, encontram-se enormes dificuldades. Visto que o setor da construção civil ao mesmo tempo que é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento social e econômico mundial também é uma das maiores responsáveis pelos diversos impactos negativos causados ao meio ambiente. De acordo com o *United Nations Environment Programme* (UNEP) o setor da construção civil consome cerca de 50% a 75% dos recursos naturais, 40% da energia mundial, 15% dos recursos hídricos e é responsável por 30% a 40% das emissões de CO₂ no mundo, além de ser a indústria que mais gera resíduos do planeta. Segundo o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS) só no Brasil o setor da construção civil é responsável por 60% dos resíduos gerados.

Nesse contexto, para Silva (2015) um fator importante a ser considerado, principalmente em se tratando da indústria da construção civil, refere-se a extração de recursos minerais, tais como a areia e a pedra britada, utilizadas como agregados aos compósitos cimentícios, visto que a produção anual desses materiais ultrapassam cerca de 200 milhões de toneladas. A utilização sem um planejamento adequado dos recursos minerais impossibilita a garantia de que esses recursos naturais possam ser usados pelas futuras gerações.

Em meio a todas essas questões, para fazer cumprir os princípios definidos para o alcance do desenvolvimento sustentável, torna-se necessário reduzir os efeitos destes impactos no meio ambiente. Uma das alternativas para amenizar esses impactos e que tem sido estudada com bastante frequência em todo o mundo é a utilização de resíduos oriundos de processos de reciclagem na produção de concretos. Primeiramente pela necessidade de destinação final dos resíduos, e também pelo concreto ser um material que tem alto potencial “empacotador”, ou seja, possui uma facilidade de incorporar diversos tipos de resíduos sem dano ao meio ambiente, além de melhorar algumas de suas propriedades (SIMÕES, 2013).

Estes resíduos podem ser provenientes de processos de demolição, ou até mesmo de rejeitos provenientes de outros produtos gerados pelo homem, tais como: pneus, plásticos, vidros e outros.

Com base no exposto, a presente dissertação tem como uma das finalidades, além de diminuir a extração dos recursos naturais, colaborar para uma destinação adequada dos resíduos de vidro do tipo sodo-cálcicos, provenientes em sua maioria de embalagens e garrafas long-neck, tão presentes nos aterros e lixões de todo o país.

A quantidade de resíduos de vidro tem aumentado gradualmente ao longo dos últimos anos em consequência ao aumento do consumo do vidro. De acordo com o CEMPRE (Compromisso Empresarial para Reciclagem), no Brasil cerca de 980 mil toneladas de embalagens de vidro são produzidas por ano, e embora o vidro seja considerado como 100% reciclável, é usado apenas cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos para a produção de novos vidros.

Segundo a ABIVIDRO (Associação Brasileira das Indústrias de Vidro), a maior limitação para a reciclagem do vidro é a ineficiência do processo de coleta e de um sistema integrado que una consumidores e fabricantes. Com isso a maior parte dos resíduos de vidro gerados acabam sendo descartados de forma irregular enquanto que menores proporções são recicladas, devido ao alto custo de limpeza, separação por tipos e cores e principalmente o alto custo com transporte até as unidades recicladoras.

Uma nova alternativa para a utilização desses resíduos de vidro é uma necessidade atual, e que contribuirá para a diminuição da disposição em locais inapropriados. Com base nesse pensamento, estudos recentes têm mostrado que o resíduo de vidro pode ser usado na fabricação de compósitos cimentícios, quer como agregado miúdo e graúdo, ou como substituto parcial do cimento, sem comprometer as propriedades dos compósitos.

Em meio a todas essas questões, pretende-se com esta dissertação estudar um concreto com a utilização de agregados de vidro reciclado como uma vantagem para redução do consumo do agregado natural e incentivo a destinação adequada desses resíduos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da utilização do resíduo de vidro como substituto parcial do agregado miúdo natural (areia) nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto, a fim de propor seu possível uso na construção civil.

1.2.2 Objetivos Específicos

Com a finalidade de atender ao objetivo geral da pesquisa, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar os agregados naturais e o resíduo de vidro utilizado como substituto do agregado miúdo (areia);
- Verificar a influência do resíduo de vidro nas propriedades físicas do concreto, no estado fresco e endurecido;
- Comparar e avaliar as propriedades mecânicas dos concretos produzidos contendo diferentes teores de resíduos de vidro com uma amostra de referência sem resíduos, em diferentes idades;
- Avaliar o efeito da substituição parcial da areia pelo resíduo de vidro, no comportamento da absorção de água por imersão e por capilaridade e
- Avaliar o efeito da substituição parcial da areia pelo resíduo de vidro, no comportamento expansivo da reação álcali-agregado nos ensaios de barra de argamassa.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

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

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico sobre alguns estudos já realizados por diversos pesquisadores utilizando o resíduo de vidro na construção civil.

No Capítulo 3 é relatado o procedimento experimental do trabalho, desde os ensaios realizados na caracterização dos materiais, as dosagens e os teores de substituição adotados nos concretos estudados, a moldagem dos corpos de prova e os ensaios das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto nos estados fresco e endurecido

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no programa experimental. E por último o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas através das observações, resultados e discussões relativas às propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade do concreto nos diferentes traços com e sem resíduo de vidro. Também são apontadas algumas sugestões para estudos futuros relacionados ao tema.

2 APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Diferentes resíduos vêm sendo estudados na incorporação de compósitos cimentícios, tais como: resíduos da construção civil (RABELLO ET AL., 2015), escória granulada de alto forno (GÓMEZ-ZAMORANO, 2015), cinza volante (PINHO ET AL., 2017), sílica ativa (QUEIROZ 2017), poliestireno (ROCHA, 2016), garrafa pet triturada (OLIVEIRA ET AL., 2016), borracha de pneu (SAAD ET AL., 2017) e outros.

Os diferentes resíduos estudados atualmente para a incorporação na construção civil passam por diversos processos de reciclagem devido as suas distintas propriedades. Estudos já realizados apontam que o concreto com agregados reciclados pode ser aplicado de diferentes formas, desde concretos de baixa resistência a concretos de alta resistência, além de argamassas.

A utilização do resíduo de vidro na construção civil em diferentes aplicações, vem sendo estudada por pesquisadores de diversos países. A maior parte dessas pesquisas estão voltadas para aplicação em concretos e argamassas, geralmente se fazendo a substituição parcial do cimento e/ou do agregado miúdo pelo resíduo de vidro.

Segundo Taha e Nouno (2008), o primeiro trabalho de pesquisa que estudou o pó de vidro como material pozolânico foi realizado em 1973 por Pattengill e Shutt, no Novo México, Estados Unidos. E a primeira pesquisa avaliando o risco potencial de expansão da reação álcali-agregado, em concreto com o resíduo de vidro como substituto do agregado, foi realizada por Schmidt e Ásia em 1963. Ao longo dos anos várias outras pesquisas foram realizadas com intuito de avaliar a aplicação do resíduo de vidro na qualidade e durabilidade dos compósitos cimentícios, principalmente em relação as propriedades mecânicas, a mitigação da expansão da reação álcali-agregado, e aos benefícios econômicos e ambientais, na qual se pode acrescentar valor ao desenvolvimento sustentável da construção civil.

No Quadro 1 são apresentadas algumas pesquisas de destaque envolvendo a utilização de resíduos de vidro como substituto parcial ou integral de constituintes do concreto. Foram analisados 29 trabalhos científicos, publicados em revistas e congressos, principalmente, internacionais.

Quadro 1 - Pesquisas com resíduos de vidro na composição de concretos - continua

TÍTULO E AUTOR	Ano	Origem	Material Substituído
<i>Studies on concrete containing ground waste glass.</i> (Shao et al.)	2000	Canadá	Cimento
<i>Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs.</i> (Shayan e Xu)	2006	Austrália	Cimento e agregado miúdo
<i>Use of waste glass as aggregate in concrete.</i> (Hong et al.)	2007	China	Agregados graúdo e miúdo
<i>Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors.</i> (Taha e Nounu)	2008	Inglaterra	Cimento e agregado miúdo
<i>Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.</i> (Ismail e Al-Hashmi)	2009	Iraque	Agregado miúdo
<i>The use of sheet glass powder as fine aggregate replacement in concrete.</i> (Mageswari e Vidivelli)	2010	Índia	Agregado miúdo
<i>Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong.</i> (Ling et al.)	2012	China	Agregados e cimento
<i>Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement.</i> (Nassar e Soroushian)	2012	Estados Unidos	Cimento
<i>Use of glass wastes as fine aggregate in concrete.</i> (Gautam et al.)	2012	Índia	Agregado miúdo
<i>Waste glass - a supplementary cementitious material.</i> (Federico)	2013	Canadá	Cimento
<i>Study of concrete involving use of waste glass as partial replacement of fine aggregates.</i> (Malik et al.)	2013	Índia	Agregado miúdo
<i>Effect of using glass powder in concrete.</i> (Raju e Kumar)	2014	Índia	Cimento
<i>Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength.</i> (Adaway e Wang)	2015	Austrália	Agregado miúdo
<i>Glass waste in concrete: Effect on workability and compressive strength.</i> (Singh et al.)	2015	Índia	Cimento e agregado miúdo
<i>Effective utilisation of waste glass in concrete.</i> (Shaikh et al.)	2015	Índia	Cimento e agregado miúdo
<i>Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice.</i> (Islam et al.)	2016	Bangladesh	Cimento
<i>Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder.</i> (Matos et al.)	2016	Portugal	Cimento
<i>Replacement of fine aggregate with glass powder in high performance concrete.</i> (Anusha e Reddy)	2016	Índia	Agregado miúdo

Quadro 1 - Pesquisas com resíduos de vidro na composição de concretos - conclusão

TÍTULO E AUTOR	Ano	Origem	Material Substituído
<i>Replacement of sand by sheet glass powder in concrete.</i> (Ramasubramani et al.)	2016	Índia	Agregado miúdo
<i>Utilization of waste glass micro-particles in producing self-consolidating concrete mixtures.</i> (Sharifi et al.)	2016	Irã	Cimento
<i>Effect of glass powder on concrete sustainability.</i> (Zidol et al.)	2017	Canadá	Cimento
<i>Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand.</i> (Olofinnade et al.)	2018	Nigéria	Agregado miúdo
<i>Mitigation effect of waste glass powders on alkali-silica reaction (ASR) expansion in cementitious composite.</i> (Ke et al.)	2018	Austrália	Cimento
<i>Reuse of glass in concrete analysis with minimizing impact of solid waste on environment.</i> (Juj et al.)	2018	Paquistão	Agregado miúdo
NO BRASIL			
TÍTULO E AUTOR	Ano	Origem	Material Substituído
Concreto produzido com parte de resíduo de vidro na ilha de Fernando de Noronha-PE. (Costa e Silva et al.)	2011	Brasil	Agregado miúdo
Propriedades físico-mecânicas do concreto de cimento portland contendo resíduo vítreo como agregado miúdo. (Miranda Jr.)	2012	Brasil	Agregado miúdo
Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto. (Simões)	2013	Brasil	Cimento
Produção de concreto cimentício com agregado de resíduos de vidro plano temperado. (Silva)	2015	Brasil	Agregado graúdo
Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento. (Guignone)	2017	Brasil	Cimento

Fonte: Autora

Para uma melhor análise, este capítulo foi dividido em três seções. Na primeira foi feita uma apresentação das principais variáveis utilizadas pelos autores na produção dos concretos. Na segunda seção, foram explanados os resultados de algumas propriedades analisadas. E por último é apresentado um resumo das principais conclusões obtidas com o estudo dessas pesquisas.

2.1 VARIÁVEIS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Nesta seção são analisados apenas os conteúdos das pesquisas em que o resíduo de vidro foi empregado em concretos como substituto parcial ou integral do agregado miúdo natural, uma vez que o objetivo desta dissertação é avaliar a utilização do resíduo de vidro em substituição da areia utilizada na fabricação de concretos.

Os níveis de substituição dos agregados naturais utilizados nos estudos variaram de 4% até 100%, porém os percentuais que mais aparecem são abaixo dos 50%, visto que estudos anteriores já haviam constatado que porcentagens de substituição muito altas prejudicam as propriedades do concreto.

Os materiais reciclados, conforme relatado na literatura, são oriundos de diversas fontes, características e tipos, como o vidro comum, o laminado e o temperado. Os resíduos foram normalmente fornecidos por indústrias de vidro, vidraçarias, unidades recicladoras ou por coleta seletiva, sendo o resíduo mais utilizado proveniente da reciclagem de embalagens. Também foi constatado que o uso de vidro de diferentes cores, como verdes, âmbar, azuis, transparentes e/ou misturados não influenciam nas propriedades do concreto (ADAWAY e WANG, 2015). As propriedades dos resíduos de vidro utilizados, como módulo de finura, massa específica e massa unitária foram geralmente avaliadas seguindo as mesmas metodologias designadas por normas de agregados naturais.

Foi relatado por diversos autores que o tamanho das partículas de resíduo de vidro pode influenciar diretamente no aparecimento da reação álcali-agregado (RAA), prejudicando a durabilidade das estruturas de concreto. Adaway e Wang (2015) relatam que os maiores benefícios ao concreto podem ser derivados da incorporação de resíduos de vidro como substituto do agregado miúdo, porém com tamanho de partículas limitadas para garantir que os efeitos prejudiciais da RAA sejam mitigados. Em seus experimentos esses autores descartaram as partículas de vidro maiores que 1,18 mm, afim de evitar a RAA. Outros pesquisadores também optaram por utilizar partículas com tamanho inferior as da areia, como Ismail e Al-Hashmi (2009), Juj et al. (2018), Mageswari e Vidivelli (2010), Malik et al. (2013), Olofinnade et al. (2018) e Taha e Nounu (2008), afirmando que as expansões devido a RAA são controladas quando o resíduo de vidro utilizado apresenta uma granulometria fina.

Quanto aos métodos de dosagem, preparação e moldagem das misturas contendo resíduo de vidro, também foram semelhantes aos procedimentos especificados em normas para os concretos convencionais. O tipo de cimento utilizado, em geral, foi o Cimento Portland em classificações comumente comercializadas nas regiões onde as pesquisas foram realizadas, o agregado miúdo natural proveniente de areia quartzosa e o agregado graúdo de origem basáltica ou granítica.

A maioria dos estudos utilizaram traço com relação água/cimento (a/c) entre 0,50 e 0,55, e mantiveram esta relação constante para a confecção dos concretos de referência e para os com acréscimo de resíduos de vidro. No entanto, em alguns casos foram adotadas relações a/c variadas, buscando-se manter o abatimento das diferentes misturas produzidas, como o que aconteceu na pesquisa de Shayan e Xu (2006). A maior relação a/c observada foi de 0,58 para Miranda Jr. (2012) e a menor foi de 0,35 para Anusha e Reddy (2016). Em casos particulares, como Gautam et al. (2012) e Singh et al. (2015) foi feito o uso de aditivos superplastificantes e redutores de permeabilidade respectivamente, com intuito de melhorar a trabalhabilidade e a diminuição da porosidade do material confeccionado.

Quanto ao consumo de cimento, valores entre 275 kg/m^3 (OLOFINNADE ET AL., 2018) e 458 kg/m^3 (ADAWAY e WANG, 2015) foram observados, porém o valor mais comum entre os autores é de 380 kg/m^3 (GAUTAM ET AL., 2012; ISMAIL e AL-HASHMI, 2009; SHAYAN e XU, 2006; SINGH ET AL., 2015). O consumo de cimento nas pesquisas se manteve constante nos traços com e sem substituição pelo resíduo de vidro.

Observou-se uma unanimidade dos ambientes de cura relatados, sendo adotada a cura em câmara úmida em condições normais estabelecidas em normas. Para a análise das propriedades dos concretos no estado endurecido foram realizados ensaios em diversas idades, entretanto as idades mais comuns foram aos 7 e 28 dias de idade (ISMAIL e AL-HASHMI, 2009; COSTA E SILVA ET AL., 2011; RAMASUBRAMANI ET AL., 2016).

As principais variáveis adotadas pelos autores para a produção dos concretos são o tipo de vidro, a dimensão das partículas, o módulo de finura, as porcentagens de substituição, o consumo de cimento, o uso de aditivo, a relação água/cimento e outros. A Tabela 1 lista algumas dessas variáveis, conforme relatado na literatura.

Tabela 1 - Variáveis adotadas pelos autores para a confecção dos concretos

Referência	Material Substituído	Tipo de vidro	Módulo de finura	Dimensão das partículas de RV	Porcentagem de substituição	Consumo de cimento	Aditivo	Tipo de Cura	Relação a/c
Shayan e Xu (2006)	Cimento e agregado miúdo	comum	3,35 areia	(10 µm cimento) e (< 2,36 mm areia)	(20% e 30% cimento) e 40%, 50% e 75% areia)	380 kg/m ³	sim	câmara úmida	0,49
Taha e Nounu (2008)	Cimento e agregado miúdo	-	-	45 µm	20% cimento 50% e 100% areia	-	nitrito de lítio	câmara úmida	-
Ismail e Al-Hashmi (2009)	Agregado miúdo	variados	2,36	-	10%, 15% e 20%	380 kg/m ³	não usou	imerso em água	0,53
Mageswari e Vidivelli (2010)	Agregado miúdo	laminado	2,16	< 1,18 mm	10%, 20%, 30%, 40% e 50%	-	-	câmara úmida	0,48
Gautam et al. (2012)	Agregado miúdo	comum	-	-	10%, 20%, 30%, 40% e 50%	380 kg/m ³	reduzidor de permeabilidade	câmara úmida	0,50
Malik et al. (2013)	Agregado miúdo	comum	-	< 1,18 mm	10%, 20%, 30% e 40%	425,8 kg/m ³	-	câmara úmida	0,45
Adaway e Wang (2015)	Agregado miúdo	comum	2,11	< 1,18 mm	15%, 20%, 25%, 30% e 40%	458 kg/m ³	-	câmara úmida	0,42
Singh et al. (2015)	Cimento e agregado miúdo	-	2,94 areia	(< 150 µm cimento) e (< 4,75 mm areia)	(5% - 25% de cimento) e (10% - 70% de areia)	380 kg/m ³	superplastificante	câmara úmida	-
Shaikh et al. (2015)	Cimento e agregado miúdo	-	-	(90 µm cimento) e (< 2,36 mm areia)	5%, 10%, 15% e 20%	-	-	câmara úmida	0,50
Anusha e Reddy (2016)	Agregado miúdo	comum	3,36	< 2,36 mm	10%, 20% e 30%	398,5 kg/m ³	-	câmara úmida	0,35
Ramasubramani et al. (2016)	Agregado miúdo	comum	-	-	10%, 25% e 50%	-	não usou	câmara úmida	0,55
Olofinnade et al. (2018)	Agregado miúdo	comum	2,99	-	25%, 50%, 75% e 100%	275 kg/m ³	-	câmara úmida	0,50
Juj et al. (2018)	Agregado miúdo	comum	-	< 1,71 mm	4%, 8%, 12%, 16%, 20%, 24%, 28%, 32%, 36% e 40%	-	-	-	-
Costa e Silva et al. (2011)	Agregado miúdo	comum	2,76	< 4,80 mm	50% e 100%	-	-	câmara úmida	0,55
Miranda Jr. (2012)	Agregado miúdo	temperado	3,88	< 4,75 mm	5%, 10% e 20%	-	não usou	câmara úmida	0,50, 0,55 e 0,58

Fonte: Autora a partir de dados de vários autores

2.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS ANALISADOS

Nesta seção foi concretizado um levantamento dos resultados de alguns ensaios correspondentes aos mesmos produzidos nesta dissertação, afim de analisar as propriedades dos concretos produzidos nas pesquisas de diferentes autores. Assim como na seção anterior foi dada relevância maior aos concretos com substituição parcial da areia, porém em alguns casos, para uma melhor exploração do uso do resíduo de vidro no concreto, também foram avaliados os resultados de amostras com substituição parcial do cimento, como por exemplo os trabalhos que envolvem a expansão da reação álcali-agregado (RAA).

As principais propriedades analisadas por meio dos estudos desses autores foram o índice de consistência e massa específica do concreto fresco e endurecido para análise das propriedades físicas, a resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade para análise das propriedades mecânicas e, para avaliação das propriedades de durabilidade foram estudados os ensaios de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e a expansão da reação álcali-agregado. Contudo, percebeu-se um número maior de pesquisas avaliando principalmente as propriedades de consistência do concreto fresco, a resistência mecânica à compressão e a resistência à expansão álcali-agregado.

Embora outras propriedades tenham sido analisadas pela literatura, como resistência à flexão, permeabilidade à íons cloreto, ataque por sulfatos, carbonatação, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX), são apresentados apenas os resultados dos ensaios de interesse do estudo dessa dissertação.

As metodologias de ensaio adotadas para avaliação das propriedades, na maioria das vezes, foram feitas utilizando procedimentos normatizados para concretos. Além disso, constatou-se que nenhuma das pesquisas apresentou análise estatística dos resultados obtidos, com exceção para os trabalhos nacionais de Guignone (2017) e Miranda Jr. (2012) que fizeram uma análise de variância (ANOVA) dos dados.

2.2.1 Propriedades Físicas do Concreto

Nesta seção são apresentadas as principais constatações das bibliografias estudadas referentes às propriedades físicas do concreto produzido com agregados de resíduos de vidro, dentre elas apresentam-se considerações sobre a consistência, e a massa específica dos concretos no estado fresco e endurecido.

2.2.1.1 *Consistência*

A verificação da trabalhabilidade do concreto se dá durante o processo de produção do mesmo, obtendo-se valores de consistência da massa de concreto. Através desse ensaio ajustam-se a quantidade de água, a relação água/materiais secos, o consumo de cimento, o traço, o teor de argamassa e a necessidade de aditivos plastificantes a serem adicionados ao concreto para obtenção de uma trabalhabilidade ideal para cada concreto. Devendo a consistência atender as necessidades específicas quanto as condições de transporte, lançamento, densidade e distribuição das armaduras e outros.

Nos estudos de Shayan e Xu (2006) e Taha e Nounu (2008) constatou-se que as misturas com substituição do cimento e da areia apresentaram diminuição da consistência à medida que o teor de vidro aumentava. Taha e Nounu (2008) observaram que apesar disso a trabalhabilidade foi considerada suficiente, sem necessidade do uso de aditivos para os níveis de substituição até 50%, já em proporções mais elevadas verificou-se que o resíduo de vidro afetava negativamente as propriedades do concreto no estado fresco.

Segundo Ismail e Al-Hashmi (2009), o abatimento diminui com o aumento do teor de resíduo de vidro no concreto. Para os autores essa diminuição está relacionada à geometria das partículas de vidro, que resultou em menor fluidez, bem como à redução do módulo de finura. Contudo as misturas ainda foram consideradas viáveis na questão da trabalhabilidade.

Os pesquisadores Adaway e Wang (2015), tendo descartado as partículas de vidro maiores que 1,18 mm afim de evitar a RAA, resolveram fazer alguns ajustes para que a trabalhabilidade fosse minimamente prejudicada. Para compensar o módulo de finura, aumentaram o volume de agregado graúdo e reduziram o volume de agregado miúdo de forma proporcional ao aumento do teor de resíduo de vidro, porém mesmo com esses ajustes o abatimento das misturas com resíduo de vidro teve uma redução em comparação ao abatimento da mistura de referência. Apesar da redução, todas as misturas de concreto foram consideradas viáveis e dentro dos níveis de tolerância das normas locais.

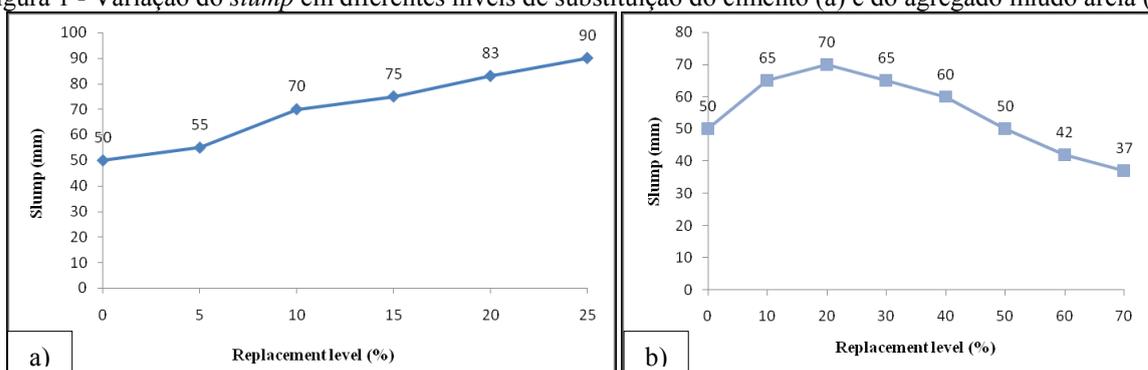
Adaway e Wang (2015) concordaram em partes com as conclusões de Ismail e Al-Hashmi (2009), eles sugerem que a redução se deve unicamente à geometria angular das partículas de vidro, contestando dessa forma a contribuição do módulo de finura para a diminuição do abatimento.

Os resultados obtidos por Olofinnade et al. (2018) mostram o valor de abatimento de 55 mm para a mistura do concreto referência, enquanto que as misturas contendo resíduo de vidro apontam uma tendência de redução do abatimento, variando de 9% a 27% em resposta ao aumento do teor de resíduos de vidro. Assim como Adaway e Wang (2015) e Ismail e Al-Hashmi (2009), os autores também atribuíram a diminuição da consistência ao formato angular das partículas de vidro, na qual provoca-se uma redução da pasta de cimento e por consequência reduz a fluidez das misturas de concreto. Os autores concluíram que os concretos com resíduo de vidro exigem um maior teor de água de mistura que o concreto de referência para produzir trabalhabilidade semelhante.

Contrário aos resultados da maioria dos pesquisadores apresentados nessa dissertação, os autores Mageswari e Vidivelli (2010), Malik et al. (2013), Shaikh et al. (2015) e Juj et al. (2018) verificaram que à medida que se aumentava o teor de substituição da areia por resíduo de vidro um ligeiro aumento no abatimento do concreto era verificado. Malik et al. (2013) sugere que as partículas de resíduo de vidro absorvem menos água que a areia, melhorando desta forma a trabalhabilidade do concreto. O melhor resultado do *slump test* foi para a mistura com 40% de resíduo de vidro no lugar do agregado miúdo areia.

Singh et al. (2015) fizeram um estudo individual da performance do resíduo de vidro como substituto do cimento e como substituto do agregado miúdo areia. Os autores observaram que na substituição do cimento os concretos tiveram um aumento do abatimento a medida que se acrescentava o teor de vidro. Este aumento foi entendido como consequência da natureza hidrofóbica do vidro. Em relação a substituição da areia foram observados valores maiores que o concreto referência até o nível de substituição de 40%, entretanto houve uma tendência a diminuição do abatimento dos concretos com o aumento do teor de resíduo de vidro. Essas variações podem ser melhor entendidas na Figura 1.

Figura 1 - Variação do *slump* em diferentes níveis de substituição do cimento (a) e do agregado miúdo areia (b)

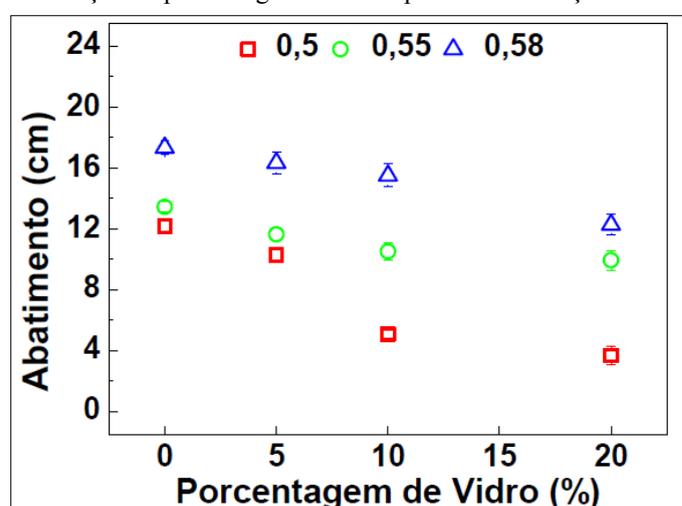


Fonte: Singh et al. (2015)

No Brasil os resultados da pesquisa de Costa e Silva et al. (2011) foram similares ao que aconteceu com Mageswari e Vidivelli (2010), Malik et al. (2013) e Shaikh et al. (2015), já os resultados de Miranda Jr. (2012) concordaram com os resultados da grande maioria dos autores internacionais.

A Figura 2 apresenta os resultados das médias alcançadas no estudo de Miranda Jr. (2011), na qual se pode observar o abatimento em função da porcentagem de vidro para as três relações a/c adotadas.

Figura 2 - Tendência das médias do abatimento do concreto em função da porcentagem de vidro para as três relações a/c



Fonte: Miranda Jr. (2012)

Para Miranda Jr. (2012) existe uma tendência das médias do abatimento em função da porcentagem de resíduo de vidro para as três relações a/c, onde se observa que o abatimento diminui com o aumento da porcentagem de vidro e com a redução da relação a/c. Assim como a maioria dos autores apresentados, Miranda Jr. (2012) afirma que a redução do abatimento com o aumento da porcentagem de vidro ocorreu principalmente devido a elevada porcentagem de finos presentes nos agregados de vidro e a geometria angular e lamelar das partículas de vidro.

2.2.1.2 Massa específica

Os efeitos acerca da massa específica no estado fresco e endurecido dos concretos com resíduo de vidro relatados nos estudos de Adaway e Wang (2015) e Ismail e Al-Hashmi (2009), foram que a medida que se aumentava o teor de resíduo de vidro na mistura a massa específica diminuía já que a densidade das partículas de vidro eram inferiores à densidade da

areia. Em ambos os casos, apesar da diminuição da massa específica das misturas dos concretos com resíduo de vidro, são ainda comparáveis às das misturas de referência.

Ismail e Al-Hashmi (2009) notaram um decréscimo da massa específica fresca de 1,28%, 1,96%, e 2,26% para os concretos feitos com 10%, 15%, e 20% de resíduos de vidro, respectivamente. E atribuíram esse acontecimento ao fato de que a densidade das partículas de vidro era aproximadamente 14,8% inferior à densidade da areia. Adaway e Wang (2015) observaram que um nível de 40% de resíduo de vidro culminou em uma variação de 2,4% e 2% em massa específica de concreto no estado fresco e no estado endurecido, respectivamente, quando comparado ao concreto de referência. Atribuíram esse resultado a densidade mais leve do agregado de vidro, que foi 5,4% mais leve que o agregado areia.

Malik et al. (2013) e Costa e Silva et al. (2011) avaliaram as massas específicas dos concretos apenas no estado endurecido, sendo observado que também houve uma diminuição da massa específica com o aumento da porcentagem de resíduo de vidro. Entretanto, no estudo de Malik et al. (2013) houve uma diferença muito pequena dos valores entre os concretos produzidos, os resultados mostraram uma redução máxima de apenas 5% da massa específica entre o concreto referência e o concreto com 40% de resíduo de vidro, considerado o mais leve dentre todos que foram confeccionados.

As pesquisas realizadas por Mageswari e Vidivelli (2010), Miranda Jr. (2012) e Juj et al. (2018) exibiram resultados opostos às pesquisas analisadas anteriormente. A medida que o teor de vidro aumenta, os valores de massa específica dos concretos no estado endurecido também cresceram nesses trabalhos. Porém os resultados de Juj et al. (2018) aumentaram apenas até a porcentagem de 12% de resíduo de vidro e depois houve uma diminuição gradual da massa específica de todas os demais concretos com substituição da areia pelo resíduo de vidro.

2.2.2 Propriedades Mecânicas do Concreto

As principais propriedades mecânicas do concreto são a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade. No contexto da utilização de resíduos de vidro em concretos como substitutos parciais da areia torna-se proeminente o estudo dessas propriedades mecânicas, uma vez que pesquisas anteriores já revelaram a potencialidade desse material no comportamento mecânico do concreto.

2.2.2.1 Resistência à Compressão

Sobre a resistência à compressão observa-se que, na maioria dos casos, com a incorporação do resíduo de vidro a resistência aumenta em comparação aos concretos sem teor de vidro em sua composição.

Um estudo realizado por Ismail e Al-Hashmi (2009) demonstra que o melhor valor de resistência à compressão foi obtido a partir da mistura de concreto feita com 20% de agregado de resíduos de vidro, o que representa um aumento na resistência de até 4,23%, em comparação ao concreto de referência. Também foi constatado pelos autores que as misturas contendo resíduo de vidro ganharam maior resistência em idade avançada, pois os resultados aos 14 dias ainda eram baixos quando comparado com os ganhos de resistência aos 28 dias, esse mesmo comportamento foi observado por Malik et al. (2013), Shaikh et al. (2015), Singh et al. (2015) e Olofinnade et al. (2018). Ismail e Al-Hashmi (2009) atribuíram esse acontecimento à diminuição da aderência entre a superfície dos agregados de vidro e a pasta de cimento e, supôs que as reações pozolânicas envolvendo o vidro apareceram para compensar essa tendência e melhorar a resistência em idade tardia, aos 28 dias.

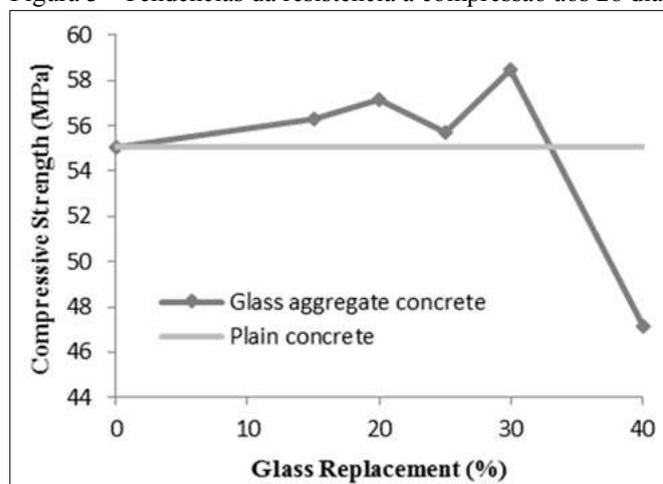
Gautam et al. (2012) observou ganho de resistência até os 20% de substituição da areia pelo resíduo de vidro aos 28 dias em comparação ao referência, entretanto foi constatado que os teores acima de 20% levou a um decréscimo da resistência à compressão. Sendo considerado o percentual de 10% como o teor ótimo de substituição pelo resíduo de vidro.

Ao contrário do que aconteceu em Ismail e Al-Hashmi (2009) e Malik et al. (2013), na pesquisa de Gautam et al. (2012) o ganho de resistência foi maior aos 7 dias de idade, com um aumento de cerca de 47,75% para o concreto com 10% de resíduo de vidro, enquanto que aos 28 dias o aumento foi de apenas 3,30% para o mesmo nível de substituição. Essa tendência foi igual para os demais níveis de substituição, porém o autor não fez qualquer sugestão do que possa ter ocasionado esse acontecimento.

Adaway e Wang (2015) constataram que uma tendência crescente da resistência à compressão pode ser testemunhada com a adição de agregado de vidro até um nível de substituição de 30%. Todas as proporções das misturas que continham resíduos de vidro até os 30% excederam a resistência do concreto de referência. A amostra contendo 40% de resíduos de vidro alcançou uma resistência à compressão 16% mais baixa que o concreto

referência, e cerca de 25% abaixo do valor máximo alcançado pelo concreto com 30% de resíduo de vidro, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Tendências da resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: Adaway e Wang (2015)

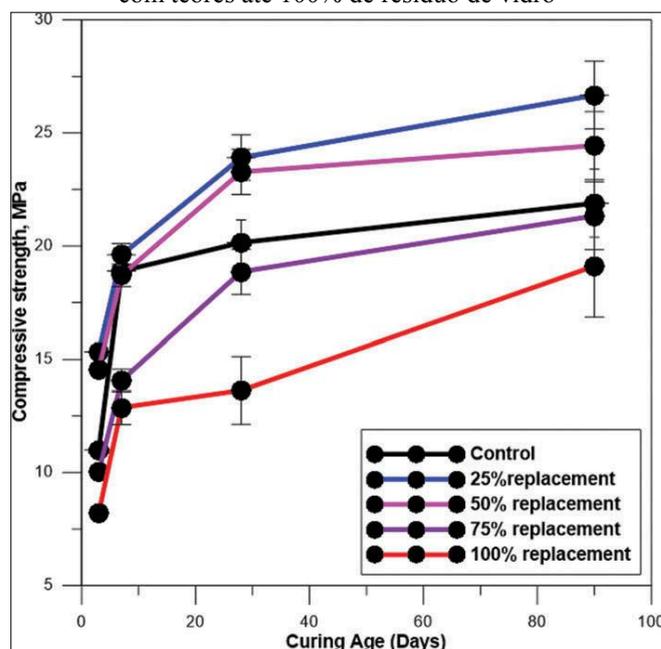
Descobertas similares foram obtidas por Juj et al. (2018) e Malik et al. (2013), que tiveram resistência máxima alcançada com teor de vidro de 12% e 20%, respectivamente, e verificaram que a resistência à compressão reduziu para as misturas com percentagem de 40% de substituição pelo resíduo de vidro em comparação aos concretos de referência. Em resposta a essas ocorrências, Adaway e Wang (2015) sugere que onde o agregado de vidro é presente em proporções mais elevadas, não há pasta de cimento disponível dentro da mistura suficiente para facilitar a ligação com todas as partículas, resultando na formação de vazios microscópicos que afetam negativamente a resistência do concreto.

Em pesquisa realizada por Shaikh et al. (2015) o concreto que atingiu resistência à compressão máxima, aos 28 dias, foi o que continha 15% de resíduo de vidro. Após o nível de 15% a resistência dos concretos começou a cair, semelhante ao que aconteceu em Adaway e Wang (2015) e Malik et al. (2013). Em comparação ao concreto de referência, os concretos com 5%, 10%, 15% e 20% de substituição da areia pelo resíduo de vidro tiveram aumento da resistência à compressão após 28 dias de 9,25%, 38,50%, 70,80%, e 33,09%, respectivamente.

Ramasubramani et al. (2016) concluiu em seus estudos, que a resistência à compressão aumenta a medida que o nível de substituição da areia pelo resíduo de vidro é aumentado. No entanto, diferente do que normalmente foi observado nas demais pesquisas bibliográficas, não houve quedas de resistência em porcentagens elevadas de resíduo de vidro, tendo obtido valor máximo de resistência para a mistura com 50% de resíduo de vidro, em todas as idades.

Semelhante a Ramasubramani et al. (2016), os resultados de Olofinnade et al. (2018) demonstraram uma tendência de crescimento da resistência em todos os teores de substituição adotados, porém somente os concretos com até 50% de resíduo de vidro obtiveram resistência superior à do concreto de referência, como pode ser visto na Figura 4. Olofinnade et al. (2018) indica que a resistência à compressão melhorada, em especial para idades mais avançadas, pode ser atribuída à influência da reação pozolânica.

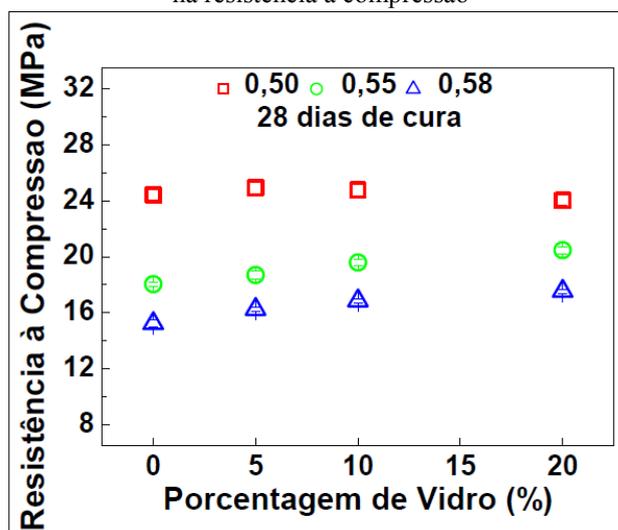
Figura 4 - Resultados de resistência à compressão com teores até 100% de resíduo de vidro



Fonte: Olofinnade et al. (2018)

A influência da porcentagem de vidro e da relação a/c na resistência à compressão do concreto para cada tempo de cura pode ser observada na pesquisa de Miranda Jr. (2012). O aumento da porcentagem de vidro utilizada em substituição ao agregado miúdo levou ao aumento da resistência à compressão, independentemente do tempo de cura, para as relações a/c 0,55 e 0,58, devido à redução do índice de vazios. Entretanto, o aumento da porcentagem de vidro proporcionou uma redução da resistência à compressão do concreto para a relação a/c 0,50, conforme a Figura 5. Para Miranda Jr. (2012), a influência da relação a/c foi considerada mais significativa do que a porcentagem de vidro.

Figura 5 - Influência do teor de vidro e da relação a/c na resistência à compressão



Fonte: Miranda Jr. (2012)

Diferente dos resultados encontrados na maioria dos estudos bibliográficos, as pesquisas de Mageswari e Vidivelli (2010), Costa e Silva et al. (2011) e Simões (2013) obtiveram resultados de resistência à compressão inferiores ao concreto de referência para todas as amostras que tiveram os resíduos de vidro em suas composições. Mageswari e Vidivelli (2010) e Costa e Silva et al. (2011) fizeram a substituição parcial do agregado de areia pelo agregado de vidro e Simões (2013) realizou substituições parciais do cimento pelo resíduo de vidro laminado.

Mageswari e Vidivelli (2010) obteve um decréscimo dos resultados com os dias de cura aumentados, e atribuiu essa diminuição a uma possível expansão da reação álcali-agregado, porém as resistências de todas as diferentes misturas de concreto, com e sem resíduo de vidro, foram consideradas semelhantes umas das outras.

Costa e Silva et al. (2011) usou nos seus estudos o mesmo resíduo de vidro (mesmo fornecedor e tipo de vidro) empregado nesta dissertação. Apesar dos resultados de resistência das amostras contendo resíduo de vidro aparecerem inferiores ao do concreto de referência, as avaliações realizadas também indicaram desempenhos satisfatórios para a utilização do resíduo de vidro em substituição à areia natural, principalmente para os teores empregados com 50% de agregado de vidro. Indicando dessa forma, a possibilidade de utilização da mistura para a produção de concretos estruturais. Os resultados obtidos por esses autores são melhor interpretados pelo gráfico da Figura 6, onde Família 1 equivale a um teor de 100% de resíduo de vidro, Família 2 com 50% e Família 3 com 0% de substituição.

Figura 6 - Variação da resistência à compressão entre as idades e os teores de vidro



Fonte: Costa e Silva et al. (2011)

Quando analisado a potencialidade do vidro quanto a utilização parcial como agregado miúdo ou como substituto parcial do cimento, um estudo realizado por Shayan e Xu (2006) demonstraram que as amostras de concreto contendo vidro como agregado miúdo alcançaram níveis mais elevados de resistência à compressão do que os que contêm vidro como uma substituição do cimento. Resultados semelhantes foram obtidos por Taha e Nouno (2008), que verificaram que o concreto contendo vidro como uma substituição parcial do cimento exibiram níveis menores de resistência à compressão do que a mistura de referência.

A resistência à compressão foi estudada por quase todos os trabalhos estudados nesta revisão bibliográfica. O Quadro 2 apresenta o percentual ideal e a influência, relatada em alguns estudos, da substituição parcial dos agregados miúdos e do cimento em relação à resistência dos concretos aos 28 dias. Observa-se que na maioria dos casos, com a incorporação de resíduo de vidro houve um aumento da resistência até determinada porcentagem de substituição. Estas constatações contribuem para o potencial uso deste material na fabricação de concretos.

Quadro 2 - Influência do resíduo de vidro na resistência à compressão dos concretos - continua

Referência	Material Substituído	Percentual	Resistência à compressão
Ismail e AL-Hashmi (2009)	Agregado miúdo	Até 20%	Aumentou
Mageswari e Vidivelli (2010)	Agregado miúdo	Até 50%	Diminuiu
Gautam et al. (2012)	Agregado miúdo	Até 20%	Aumentou
Malik et al. (2013)	Agregado miúdo	Até 20%	Aumentou
Adaway e Wang (2015)	Agregado miúdo	Até 30%	Aumentou
Anusha e Reddy (2016)	Agregado miúdo	Até 10%	Aumentou
Ramasubramani et al. (2016)	Agregado miúdo	Até 50%	Aumentou
Olofinnade et al. (2018)	Agregado miúdo	Até 50%	Aumentou
Juj et al. (2018)	Agregado miúdo	Até 12%	Aumentou

Quadro 2 - Influência do resíduo de vidro na resistência à compressão dos concretos -conclusão

Costa e Silva et al.(2011)	Agregado miúdo	Até 100%	Diminuiu
Miranda Jr. (2017)	Agregado miúdo	Até 20%	Aumentou
Shayan e Xu (2006)	Cimento e agregado miúdo	Areia: até 50% Cimento: até 20%	Aumentou
Singh et al. (2015)	Cimento e agregado miúdo	Areia: até 50% Cimento: até 15%	Aumentou
Shaikh et al. (2015)	Cimento e agregado miúdo	Até 15%	Aumentou

Fonte: Autora a partir de dados de vários autores

2.2.2.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

As pesquisas encontradas sobre a resistência a tração por compressão diametral do concreto apresentaram comportamento semelhante aos resultados de resistência a compressão axial. Foi constatado, na maioria dos casos, uma diminuição da resistência a medida que se aumenta a quantidade de resíduos de vidro na composição dos concretos, sendo registrado alguns percentuais que tenham superado a resistência a tração do concreto de referência.

Os estudos realizados por Anusha e Reddy (2016), Shaikh et al. (2015) e Ramasubramani et al. (2016) tiveram comportamento parecidos. Os concretos onde a areia foi parcialmente substituída pelo vidro mostraram um aumento da resistência à tração até certo teor de substituição da areia, no entanto apresentaram um declínio na resistência conforme o percentual de substituição foi aumentando. Além disso, também foi observado uma evolução da resistência em todos os concretos em idades mais avançadas, aos 28 dias de idade.

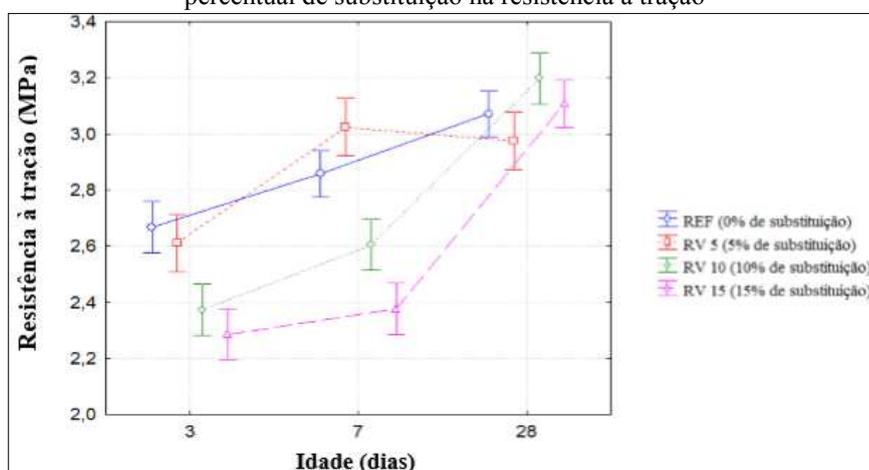
Os resultados de resistência à tração considerados ótimos para Anusha e Reddy (2016), Shaikh et al. (2015), respectivamente, foram com 10% e 15% do teor de substituição pelo resíduo de vidro, correspondendo aos mesmos teores considerados ótimos para os testes de resistência a compressão realizados pelos autores. Ramasubramani et al. (2016), alcançou nível ideal de resistência a tração com 10% do teor de substituição pelo resíduo de vidro.

Nas pesquisas realizada por Mageswari e Vidivelli (2010), Malik et al. (2013) e Olofinnade et al. (2018), todos os resultados do ensaio de resistência à tração para os concretos contendo resíduos de vidro foram inferiores aos valores obtidos para os concretos de referência. Sendo observado uma tendência de declínio da resistência a medida que o teor de vidro aumenta.

Simões (2013) fez a substituição parcial do cimento pelo pó de vidro laminado nas proporções de 5, 10 e 15%. O autor sugeriu que o efeito da utilização do resíduo nas misturas

pode ter melhorado as propriedades da zona de transição, e conseqüentemente diminuído a porosidade uma vez que houve uma tendência de aumento da resistência à tração das misturas com 10% e 15% de resíduo de vidro, as quais superaram o resultado obtido para o traço de referência. Já para o traço com 5% de pó de vidro, é possível que o ponto referente aos 28 dias possa ter sofrido alguma alteração devido a possibilidade de variabilidade do método de ensaio, fazendo com que o mesmo saísse da linha de tendência, conforme pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 - Efeito da interação entre os fatores idade e percentual de substituição na resistência à tração



Fonte: Simões (2013)

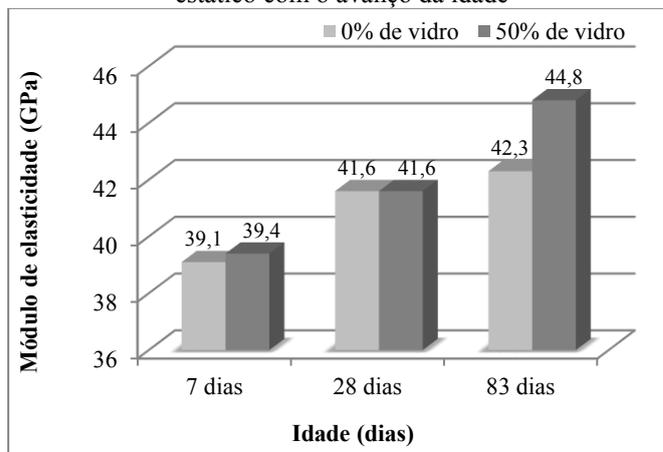
2.2.2.3 Módulo de Elasticidade

As referências bibliográficas encontradas sobre a substituição do agregado miúdo (areia) pelo agregado de resíduo de vidro não apresentaram ensaios avaliando o módulo de elasticidade. Devido a isso foram analisadas as pesquisas de Matos et al. (2016) e Simões (2013) sobre o módulo de elasticidade estático em concretos com substituição parcial do cimento pelo resíduo de vidro.

Matos et al. (2016) e Simões (2013) verificaram que o módulo de elasticidade dos concretos não mostrou diferenças significativas, embora os resultados de Matos et al. (2016) tenham remetido para um ganho no desempenho acerca do módulo de elasticidade dos concretos com a introdução do agregado de resíduo de vidro.

Concluiu-se com esses estudos que o teor de substituição e a interação entre o fator idade e percentual de substituição apresentaram-se não significativos para os resultados analisados, como pode ser visto no gráfico da Figura 8.

Figura 8 - Variação do módulo de elasticidade estático com o avanço da idade



Fonte: Autora a partir dos dados de Matos et al. (2016)

2.2.3 Propriedades de Durabilidade do Concreto

Essa seção aborda características dos concretos, produzidos com agregados de resíduo de vidro, que influenciam na durabilidade dos mesmos, dentre elas, absorção de água por imersão e por capilaridade e a expansão da reação álcali-agregado.

2.2.3.1 Absorção de Água

Em geral, observou-se uma diminuição da absorção de água nos concretos com aumento da substituição da areia por agregado de vidro. Nos estudos de Juj et al. (2018) e Malik et al. (2013) o menor valor de absorção de água por imersão foi encontrada para a mistura de concreto com conteúdo de resíduos de vidro de 40%. Enquanto Matos et al. (2016), no estudo da absorção de água por capilaridade em concretos com substituição do cimento pelo vidro, constatou que com o aumento do teor de pó de vidro, a absorção de água também diminuiu.

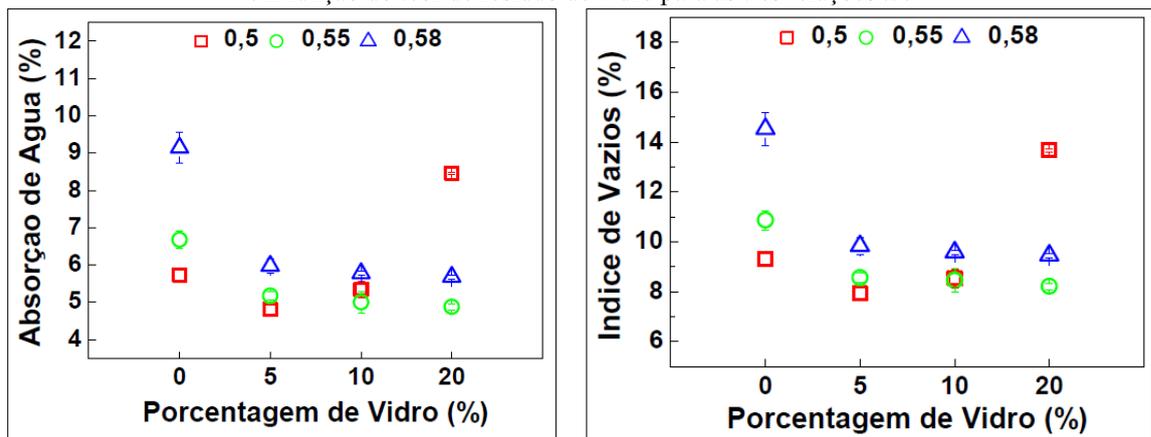
Matos et al. (2016) atribuiu a diminuição da absorção capilar ao excedente de gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), formado durante a reação pozolânica iniciada pela presença do pó de vidro, na qual melhorou a homogeneidade da microestrutura e resultou em uma menor porosidade.

Na pesquisa de Miranda Jr. (2012), pode-se observar uma tendência das médias da absorção de água por imersão em função da porcentagem de vidro para as três relações a/c adotadas. Para as relações a/c 0,55 e 0,58, o aumento da porcentagem de vidro levou a uma

redução da absorção de água em comparação aos concretos de referência, provocado pela redução do índice de vazios. Entretanto, para a relação a/c 0,50, o aumento da porcentagem de vidro proporcionou uma redução da absorção de água nos concretos com 0% a 5% de resíduo de vidro e um aumento da absorção de água para os concretos com 5% a 20% de resíduo de vidro. Outra observação é que ao se comparar os resultados das relações a/c 0,55 e 0,58, constatou-se uma absorção maior para os concretos com relação a/c 0,58 devido ao aumento da quantidade de poros gerados.

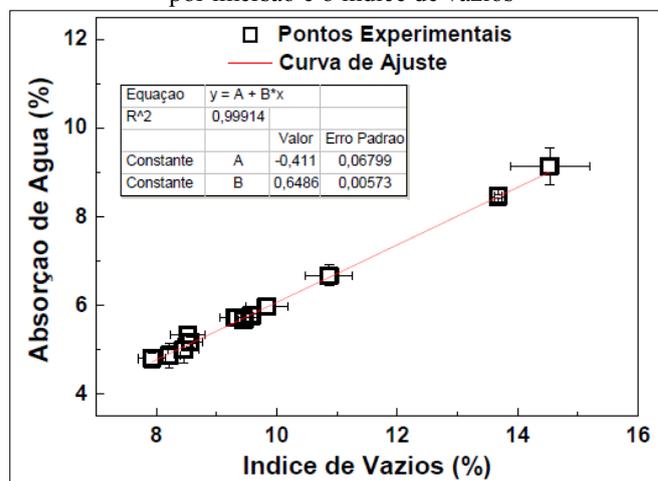
Como pode ser visto nos gráficos da Figura 9, o comportamento da absorção de água foi coerente com o comportamento do índice de vazios verificado pelo autor. A Figura 10 apresenta uma correlação linear entre a tendência das médias da absorção de água por imersão e do índice de vazios dos concretos produzidos por Miranda Jr. (2012).

Figura 9 - Tendência da absorção de água por imersão e do índice de vazios dos concretos em função do teor de resíduo de vidro para as três relações a/c



Fonte: Miranda Jr. (2012)

Figura 10 - Correlação entre a absorção de água por imersão e o índice de vazios



Fonte: Miranda Jr. (2012)

2.2.3.2 Análise da Reação Álcali-Agregado

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.

O agregado considerado reativo ou potencialmente reativo é aquele cuja a fase mineralógica contenha sílica amorfa, ou seja, não apresentam organização cristalina dos minerais. Portanto, uma das restrições apontadas por alguns pesquisadores para utilização do resíduo de vidro no preparo de concretos é a provável ocorrência da reação álcali-sílica (RAS) entre os álcalis do cimento e a sílica presente no vidro.

Foi relatado por diversos autores que o tamanho das partículas pode influenciar diretamente no aparecimento da reação álcali-agregado, prejudicando fortemente a durabilidade das estruturas de concreto. No entanto, Shao et al. (2000), Taha e Nounu (2008), Ismail e Al-Hashmi (2009), Nassar e Soroushian (2012), Guignone (2017), Sharifi et al. (2016) e outros afirmam que as expansões devido a RAA são controladas quando o resíduo de vidro utilizado apresenta uma granulometria fina o suficiente para mitigar a reação.

A Tabela 2 apresenta algumas variáveis adotadas nos trabalhos realizados por alguns pesquisadores, como o método de ensaio, a dimensão das partículas e as porcentagens de substituição.

Tabela 2 - Variáveis de produção para análise da influência na RAA

Referência	Material substituído	Método de ensaio	Dimensão das partículas de RV	Porcentagem de substituição
Ismail e Al-Hashmi (2009)	Agregado miúdo	AMBT	-	10%, 15% e 20%
Taha e Nounu (2008)	Cimento e agregado miúdo	CPT	45 µm (cimento)	20% cimento 50% e 100% areia
Shao et al. (2000)	Cimento	AMBT	< 38 µm	30%
Nassar e Soroushian (2012)	Cimento	AMBT	13 µm	20%
Matos et al. (2016)	Cimento	AMBT	-	10% e 50%
Sharifi et al. (2016)	Cimento	AMBT	< 100 µm	5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%
Ke et al. (2018)	Cimento	AMBT	38 µm a 300 µm	10%, 20% e 30%
Guignone (2017)	Cimento	AMBT	< 42 µm	10% e 20%

AMBT = Método acelerado das barras de argamassa

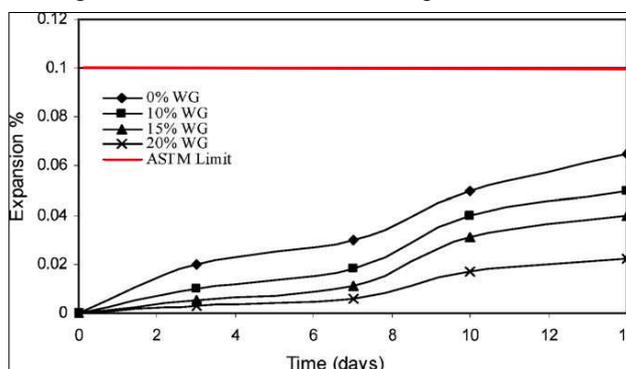
CPT = Método de prismas de concreto

Fonte: Autora a partir de dados de vários autores

Em pesquisa desempenhada por Shao et al. (2000), sobre a substituição parcial do cimento pelo resíduo de vidro, o vidro utilizado foi finamente moído com tamanho suficiente para inibir a RAA e para ativar o comportamento pozolânico. A expansão das barras de argamassa com 30% de cimento substituído pelo pó de vidro, com partículas de dimensões inferiores à 38 μ m, reduziu à metade do valor percebido nas amostras de referência. Os autores consideraram que, o desenvolvimento da resistência mecânica, e a redução da expansão foram indicativos da atividade pozolânica do resíduo de vidro.

Ismail e Al-Hashmi (2009), nos estudos sobre a substituição parcial do agregado da areia pelo resíduo de vidro, realizaram ensaio acelerado de barras de argamassa normatizado pela *American Society for Testing and Materials (ASTM) C1260-01*. Em sua pesquisa constataram que, com o aumento em conteúdo de resíduos de vidro a 20%, houve uma clara redução na expansão da RAA igual a 66%, em comparação com a mistura de referência sem resíduo de vidro. No entanto, as expansões de todas as amostras também indicaram nenhum potencial de expansão deletéria. A Figura 11 apresenta os resultados obtidos na pesquisa.

Figura 11 - Resultados de baixa expansão da RAA

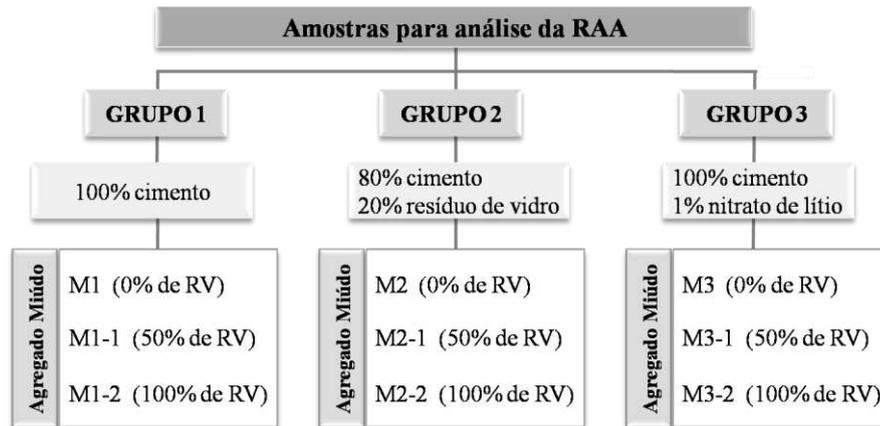


Fonte: Ismail e Al-Hashmi (2009)

O mesmo ensaio acelerado de barras de argamassa, normatizado pela ASTM C1260-01, utilizado por Ismail e Al-Hashmi (2009), também foi adotado pelos autores Guignone (2017), Ke et al. (2018), Nassar e Soroushian (2012), Shao et al. (2000) e Sharifi et al. (2016).

Taha e Nounu (2008) realizaram o ensaio dos prismas de concreto monitorado pela norma britânica BS 812-123 (1999). Os autores confeccionaram um grupo de amostras com substituição parcial do agregado de areia pelo resíduo de vidro, um outro grupo com substituição parcial da areia e do cimento pelo resíduo de vidro, e um terceiro grupo com substituição parcial da areia pelo resíduo de vidro e nitrato de lítio usado como aditivo. Cada grupo contendo 3 subgrupos, fazendo um total de 9 tipos de traço, conforme a Figura 12.

Figura 12 - Programa de teste e minimização da expansão da RAA

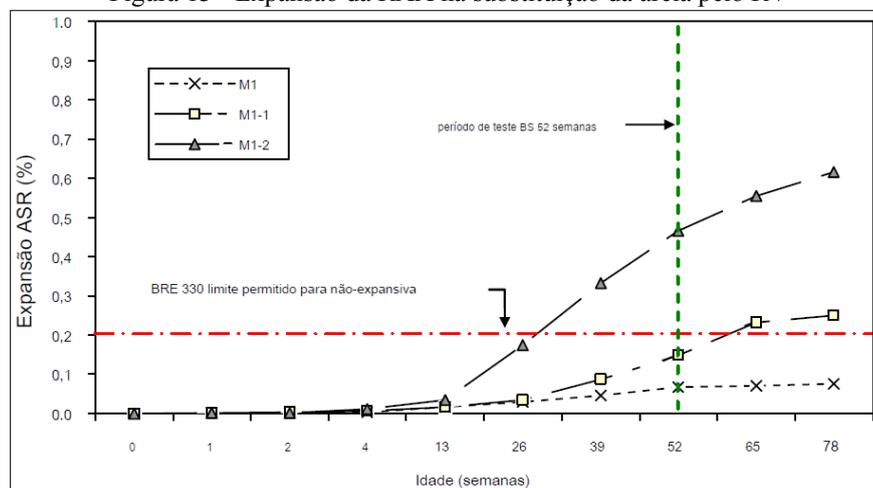


Fonte: Autora a partir de dados de Taha e Nounu (2008)

Taha e Nounu (2008) chegaram à conclusão de que a presença do resíduo de vidro apenas como substituto do agregado miúdo de areia, misturas do Grupo 1, possuem elevado risco de deterioração pela expansão da reação álcali-agregado, como mostra a Figura 13. Entretanto, quando é feita a substituição de 20% do cimento por partículas finas de resíduo de vidro, misturas do Grupo 2, a expansão de RAA foi significativamente reduzida mesmo com elevado teor de álcalis, como mostra a Figura 14. Os resultados do Grupo 3, mostraram que os compostos de lítio, adicionados como aditivo químico, também são eficientes na redução das expansões causadas pela RAA no concreto, quando usados em dosagens apropriadas.

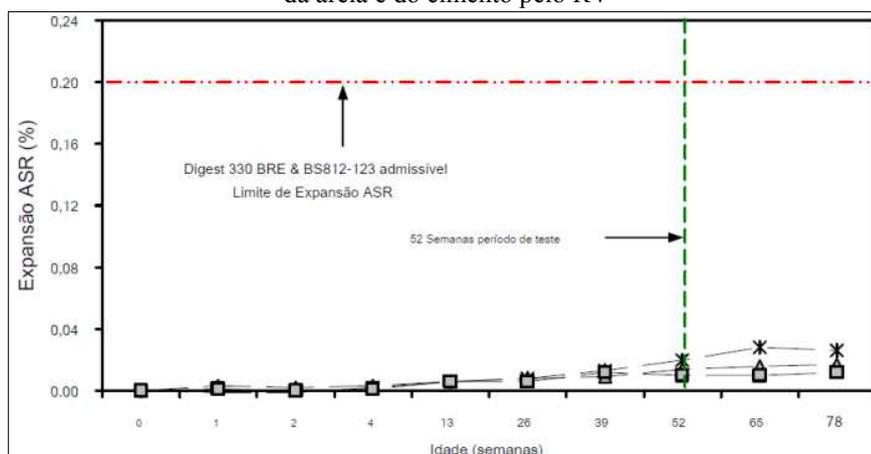
Os autores concluíram que para evitar a ocorrência de RAA no concreto com substituição da areia pelo resíduo de vidro, deverá ser utilizado algum supressor desse tipo de reação, tais como escória de alto forno, metacaulim, pó de vidro pozolânico e nitrato de lítio. (TAHA E NOUNU, 2008).

Figura 13 - Expansão da RAA na substituição da areia por RV



Fonte: Taha e Nounu (2008)

Figura 14 - Expansão da RAA na substituição da areia e do cimento pelo RV



Fonte: Taha e Nounu (2008)

Ao se fazer a substituição parcial do cimento pelo resíduo de vidro, Matos et al. (2016), Sharifi et al. (2016) e Ke et al. (2018) também constaram que quanto maior a porcentagem e menor o tamanho das partículas de resíduo de vidro, menor será a expansão deletéria de RAA, podendo considerar como inócua.

Guignone (2017) notou que apesar do resíduo de vidro apresentar quantidade de álcalis superiores aos requisitos para materiais pozolânicos, não houve elevação da expansão por reação álcali-silica. Ao contrário do que se esperava, houve uma redução nos valores principalmente com a utilização de resíduo de vidro moído. Este comportamento confirma com o constatado por outros autores, que em função da dimensão da partícula do resíduo de vidro pode-se ocorrer a mitigação da reação álcali-silica em concretos.

O Quadro 3 proporciona um resumo dos resultados de expansão da reação álcali-agregado nas pesquisas dos diversos autores citados. As setas indicando para baixo representam uma redução da expansão de RAA em relação aos limites admissíveis pelas normas seguidas na realização dos ensaios. A tabela também contempla os resultados de resistência à compressão, onde a indicação das setas representa o aumento (↑) ou diminuição (↓) da resistência comprada às amostras de referência.

Quadro 3 - Resumo dos resultados de expansão da RAA em diversas pesquisas

Referência	Material Substituído	RAA	Resistência à compressão
Ismail e Al-Hashmi (2009)	Agregado miúdo	↓	↑
Taha e Nounu (2008)	Cimento e agregado miúdo	↓ c / ↑ a	↓ c
Shao et al. (2000)	Cimento	↓	↑
Nassar e Soroushian (2012)	Cimento	↓	↑
Matos et al. (2016)	Cimento	↓	↑
Sharifi et al. (2016)	Cimento	↓	↑
Ke et al. (2018)	Cimento	↓	-
Guignone (2017)	Cimento	↓	↑

c = cimento

a = areia

Fonte: Autora a partir de dados de vários autores

Constatou-se que todos os autores apontaram explicações semelhantes para a redução da RAA em concretos produzidos com resíduo de vidro finamente moído (< 300 µm). Os autores consideraram que a diminuição da expansão está relacionada ao efeito pozolânico beneficiado pelas partículas finas de vidro.

O vidro é um material amorfo e de acordo com sua composição química possui altos níveis de sílica que é um dos requisitos primários para seu funcionamento como material pozolânico. Outro requisito para a determinação do grau de pozolanicidade é a dimensão das partículas, uma vez que a reatividade aumenta com a diminuição do tamanho das mesmas (SIMÕES, 2013).

A sílica reativa disponível no resíduo de vidro como um material amorfo, se dissolve muito rapidamente durante a reação pozolânica e reage com outros produtos químicos para formar as fases minerais do concreto, o gel C-S-H. Por isso, a sílica reativa do vidro dissolvida se acomoda nos cristais de minerais do concreto, e por consequência não haverá alcalinidade suficiente para acontecer a RAA, visto que essa ocorre em fases posteriores. Caso contrário, se existir qualquer possibilidade para formar o gel da RAA durante a reação pozolânica da sílica reativa presente no resíduo de vidro, pode-se prever que qualquer expansão de RAA existente será perceptível. (ISMAIL e AL-HASHMI, 2009; TAHA e NOUNU, 2008; SHAO ET AL., 2000; NASSAR e SOROUSHIAN, 2012; MATOS ET AL., 2016; SHARIFI ET AL., 2016; KE ET AL., 2018; GUIGNONE, 2017).

No que se refere aos resultados das várias propriedades analisadas, por meio das pesquisas bibliográficas, foram destacados nesta seção os ensaios de consistência, massa específica, resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e expansibilidade da reação álcali-agregado.

O Quadro 4 proporciona um resumo dos resultados das pesquisas dos diversos autores citados, onde a indicação das setas representa o aumento (↑) ou a diminuição (↓) dos resultados comparados às amostras de referência. Nas situações em que os concretos com resíduo de vidro mostraram um aumento dos resultados até certo nível de substituição e que com o aumento do teor de vidro os valores diminuíram estão representados pelas setas (↑↓).

Quadro 4 - Resumo dos principais resultados das pesquisas analisadas

Referência	Slump	Massa específica		Resistência		Módulo de elasticidade	Absorção de água		Expansão da RAA
		Fresco	Endurecido	Compressão	Tração		Imersão	Capilar	
Agregado Miúdo									
Ismail e Al-Hashmi (2009)	↓	↓	↓	↑	-	-	-	-	↓
Mageswari e Vidivelli (2010)	↑	-	↑	↓	↓	-	-	-	-
Gautam et al. (2012)	-	-	-	↑↓	-	-	-	-	-
Malik et al. (2013)	↑	-	↓	↑↓	↓	-	↓	-	-
Adaway e Wang (2015)	↓	↓	↓	↑↓	-	-	-	-	-
Anusha e Reddy (2016)	-	-	-	↑↓	↑↓	-	-	-	-
Ramasubramani et al. (2016)	-	-	-	↑	↑↓	-	-	-	-
Olofinnade et al. (2018)	↓	-	-	↑	↓	-	-	-	-
Juj et al. (2018)	↑	-	↑↓	↑↓	-	-	↓	-	-
Costa e Silva et al. (2011)	↑	-	↓	↓	-	-	-	-	-
Miranda Jr. (2012)	↓	-	↑	↑	-	-	↓	-	-
Silva (2015)	↑	-	-	↑↓	-	-	-	-	-
Cimento (c) e Agregado Miúdo (a)									
Shayan e Xu (2006)	↓	-	-	↓ c / ↑ a	-	-	-	-	-
Taha e Nounu (2008)	↓	-	-	↓ c	-	-	-	-	↓ c / ↑ a
Singh et al. (2015)	↑ c / ↓ a	-	-	↑	-	-	-	-	-
Shaikh et al. (2015)	↑	-	-	↑↓	↑↓	-	-	-	-
Cimento									
Shao et al. (2000)	↓	-	-	↑	-	-	-	-	↓
Nassar e Soroushian (2012)	↑	↓	↓	↑	-	-	↓	-	↓
Federico (2013)	-	-	-	-	-	-	-	-	↑
Matos et al. (2016)	-	-	-	↑	-	↑	-	↓	↓
Sharifi et al. (2016)	↑	-	↓	↑	↑	-	↓	-	↓
Guignone (2017)	↓	↓	↓	↑	-	-	-	-	↓
Ke et al. (2018)	-	-	-	-	-	-	-	-	↓
Simões (2013)	↓	↑	-	↓	↓	↑↓	-	-	-

Fonte: Autora a partir de dados de vários autores

2.2.4 Resumo das Conclusões Relatadas na Literatura

Conclui-se com a revisão bibliográfica que o uso do resíduo de vidro (RV) tem potencial de ser utilizado na composição de concretos em substituição ao agregado miúdo, assim como também funciona como um material pozolânico, permitindo efeito similar aos dos materiais cimentantes utilizados no concreto. Quando utilizado como agregado miúdo, pode causar a RAA, entretanto, quando utilizado na forma de pó, pode evitar que ocorra a RAA, funcionando como um material pozolânico.

Em relação à resistência mecânica, concluiu-se que os concretos com resíduo de vidro tendem a ganhar maior resistência em idades avançadas, e os melhores resultados se apresentaram para os concretos com teores abaixo dos 30% de substituição parcial da areia pelo resíduo de vidro. Com isso, entende-se que maiores benfeitorias podem ser derivadas da incorporação do RV como agregado miúdo, porém com granulometria limitada ou com adições pozolânicas para garantir que efeitos prejudiciais da RAA sejam mitigados.

Em relação à consistência do concreto, observou-se que a medida que a quantidade de vidro aumenta perde-se um pouco da trabalhabilidade, devido à geometria angular e à granulometria mais fina das partículas de vidro. A massa específica e absorção de água também são induzidas a uma redução na unidade de peso do concreto, visto que a densidade do vidro é menor que a da areia, entretanto esse acontecimento é entendido como um benefício às propriedades do concreto.

O Quadro 5 apresenta um resumo das principais conclusões dos trabalhos pesquisados.

Quadro 5 - Resumo dos estudos citados - continua

Material	Referência	Principais Ensaios	Principais Conclusões
Agregado Miúdo	Ismail e Al-Hashmi (2009)	<i>Slump</i> Massa Específica Resistência à Compressão Expansão da RAA	A diminuição do <i>slump</i> e da massa específica foram relacionadas à geometria angular e ao módulo de finura das partículas. Mitigação da reação álcali-agregado.
	Mageswari e Vidivelli (2010)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Resistência à tração	Os autores atribuíram a redução das resistência à compressão e à tração à uma possível expansão da RAA.
	Gautam et al. (2012)	Resistência à compressão	Considerou percentual ótimo com 10% de substituição pelo RV.

Quadro 5 - Resumos dos estudos citados - continua

Material	Referência	Principais Ensaios	Principais Conclusões
	Malik et al. (2013)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Resistência à tração Absorção de água por imersão	O autor sugere que as partículas de RV absorvem menos água que as da areia. Diminuição pouco significativa da massa específica endurecida. A resistência à compressão aumentou até o teor de 20%, depois começou a decair com o aumento do teor de RV.
	Adaway e Wang (2015)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão	A redução do <i>slump</i> foi atribuída unicamente à geometria angular das partículas de RV e a redução da massa específica foi devido à densidade do vidro ser menor que a da areia. Tendência crescente da resistência até 30%, depois começa a decair.
	Anusha e Reddy (2016)	Resistência à compressão Resistência à tração	Alcançou nível ideal de substituição com 10% de RV para a resistência à compressão e à tração, porém com o aumento do teor de RV houve uma diminuição nas resistências.
Agregado Miúdo	Ramasubramani et al. (2016)	Resistência à compressão Resistência à tração	Tendência de crescimento da resistência à compressão em todos os teores com RV. Alcançou nível ideal de substituição com 10% para a resistência à tração e a evolução da resistência foi melhor em idades mais avançadas.
	Olofinnade et al. (2018)	<i>Slump</i> Resistência à compressão Resistência à tração	Tendência de crescimento da resistência em todos os teores de RV, porém somente os concretos com até 50% de RV obtiveram resistência superior a do concreto de referência. Tendência de declínio da resistência à tração a medida que o teor de vidro aumenta.
	Juj et al. (2018)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Absorção de água por imersão	Alcançou nível ideal de substituição com 12% de RV para a resistência à compressão.
	Costa e Silva et al. (2011)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão	Apesar da diminuição da resistência, os concretos com resíduo de vidro ainda se enquadraram para uso estrutural.
	Miranda Jr. (2012)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Absorção de água por imersão	Atribui a redução do slump à porcentagem de finos e à geometria angular do RV. Considerou a influência da relação a/c mais significativa do que a porcentagem de RV.

Quadro 5 - Resumo dos estudos citados - conclusão

Material	Referência	Principais Ensaios	Principais Conclusões
Cimento e Agregado Miúdo	Shayan e Xu (2006)	<i>Slump</i> Resistência à compressão	A resistência foi melhor para o uso do RV como agregado miúdo do que na substituição do cimento.
	Taha e Nounu (2008)	<i>Slump</i> Resistência à compressão Expansão da RAA	A substituição da areia provocou elevado risco de deterioração pela RAA, mas quando é adicionado 20% de substituição do cimento pelo RV a expansão é reduzida. Nitrato de Lítio foi usado para mitigar a RAA em amostras que teve o RV como agregado miúdo .
	Singh et al. (2015)	<i>Slump</i> Resistência à compressão	Os concretos com RV ganharam maior resistência em idade avançada.
	Shaikh et al. (2015)	<i>Slump</i> Resistência à compressão Resistência à tração	Alcançou nível ideal de substituição com 15% de RV para a resistência à compressão e à tração, porém com o aumento do teor de RV houve uma diminuição nas resistências.
Cimento	Shao et al. (2000)	<i>Slump</i> Resistência à compressão Expansão da RAA	O desenvolvimento da resistência mecânica, e a redução da expansão foram associados à atividade pozolânica do resíduo de vidro.
	Nassar e Soroushian (2012)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Absorção de água por imersão Expansão da RAA	As expansões devido a RAA foram controladas com o uso do resíduo de vidro em granulometria fina o suficiente para mitigar a reação.
	Matos et al. (2016)	Resistência à compressão Módulo de Elasticidade Absorção de água por capilaridade Expansão da RAA	As expansões devido a RAA foram controladas com o uso do resíduo de vidro em granulometria fina o suficiente para mitigar a reação.
	Sharifi et al. (2016)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Resistência à tração Absorção de água por imersão Expansão da RAA	As expansões devido a RAA foram controladas com o uso do resíduo de vidro em granulometria fina o suficiente para mitigar a reação.
	Guignone (2017)	<i>Slump</i> Massa específica Resistência à compressão Expansão da RAA	As expansões devido a RAA foram controladas com o uso do resíduo de vidro em granulometria fina o suficiente para mitigar a reação.
	Ke et al. (2018)	Expansão da RAA	As expansões devido a RAA foram controladas com o uso do resíduo de vidro em granulometria fina o suficiente para mitigar a reação.

Fonte: Autora a partir de dados de vários autores

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental apresenta os procedimentos realizados para a obtenção dos resultados e avaliação da viabilidade técnica do resíduo de vidro na confecção dos concretos, tendo em vista atender os objetivos propostos inicialmente. Para isso, foram moldados corpos de prova com incorporação de resíduos de vidro substituindo parcialmente a areia.

Foram realizados primeiramente a caracterização dos materiais utilizados, em seguida os procedimentos de dosagem, produção e moldagem dos corpos de prova, e por último a realização dos ensaios nos concretos no estado fresco e endurecido e os ensaios de durabilidade.

Os estudos laboratoriais desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM) da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), no Laboratório de Química Geral e Inorgânica (LQGI) também pertencente a Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP) e no Laboratório da empresa privada de Tecnologia da Construção Civil, TECOMAT Engenharia.

3.1 VARIÁVEIS DO PROGRAMA

Para este trabalho foram considerados três tipos distintos de variáveis, que são: variáveis independentes, de controle e variáveis dependentes, como seguem no Quadro 6.

Quadro 6 - Variáveis do Programa

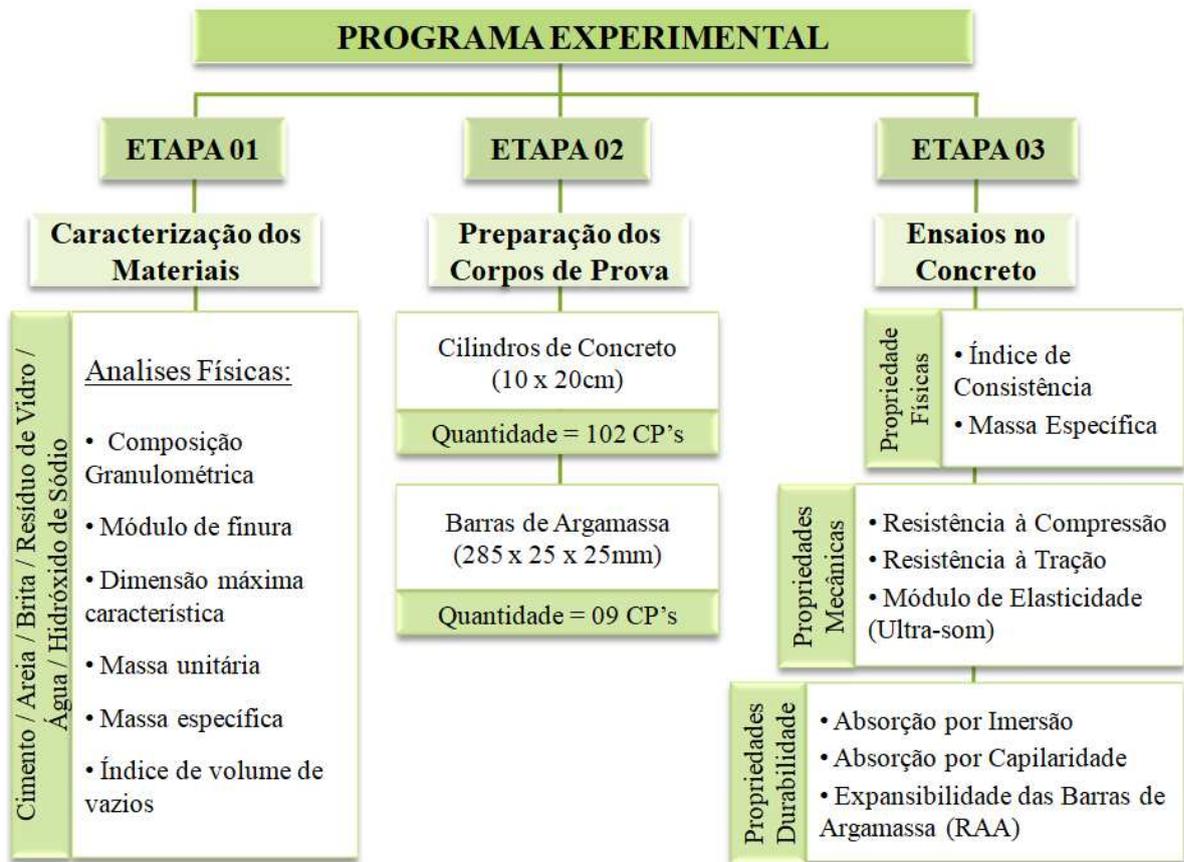
Tipo De Variável	Variáveis
Independentes	<ul style="list-style-type: none"> • Porcentagens de Resíduo de Vidro (0, 15 e 30%) • Idade de realização dos ensaios (7, 28 e 148 dias)
Controle	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de cimento (CP II Z-32) • Tipo de agregados • Relação água/cimento ($a/c = 0,55$) • Procedimento de mistura (mecânica) • Procedimento de cura (cura úmida submersa)
Dependentes	<ul style="list-style-type: none"> • Índice de consistência • Massa específica • Resistência à compressão (25 MPa) • Resistência à tração • Módulo de elasticidade • Absorção de água por imersão • Absorção de água por capilaridade • Expansibilidade das barras de argamassa

Fonte: Autora (2019)

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o melhor entendimento e execução do programa experimental os procedimentos laboratoriais foram organizados em três etapas: Etapa 01 - caracterização dos materiais utilizados, Etapa 02 - dosagem, produção e moldagem dos corpos de prova e, Etapa 03 - ensaios para determinação das propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos. Conforme pode ser visualizado no organograma da Figura 15.

Figura 15 - Programa Experimental



Fonte: Autora (2019)

Para a determinação das propriedades físicas do concreto, foram definidos, os ensaios do índice de consistência pelo abatimento de tronco de cone e, o ensaio de massa específica do concreto fresco e endurecido. Para a determinação das propriedades mecânicas, foram definidos, no estado endurecido, os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico por meio de ondas ultrassônicas. Para as propriedades relacionadas à durabilidade dos concretos foram definidos, no estado endurecido, os ensaios de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e, expansibilidade das barras de argamassa para Reação Álcali-Agregado (RAA).

Na escolha dos métodos utilizados, procurou-se seguir aqueles normatizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e já utilizados com sucesso por outros pesquisadores. Os ensaios foram realizados dentro do planejamento experimental nas datas previstas de forma que os equipamentos utilizados foram os mesmos em todos os procedimentos.

3.3 ETAPA 01 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados para o preparo dos 102 corpos de prova cilíndricos de concreto e das 9 barras de argamassa foram: cimento Portland CP II Z-32 para os cilindros e CP V ARI para as barras, areia natural quartzosa, brita de origem basáltica, resíduo de vidro comum, água fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), água destilada e hidróxido de sódio.

3.3.1 Cimento

O cimento utilizado para a confecção dos cilindros de concreto foi do tipo Portland Composto, CP II Z-32 da marca POTY, obedecendo às especificações da norma NBR 16697 (ABNT, 2018). A preferência desse tipo de cimento se deu pelo fato de poder proporcionar uma menor permeabilidade ao concreto e se diferenciar, entre os disponíveis no mercado nacional, por ser o que contém menor teor de pozolana, com 6 a 14% de adição, segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018). Além de ser o mais comumente encontrado no comércio local da Região Metropolitana do Recife (RMR).

Para a confecção das barras de argamassa foi utilizado o cimento Portland CP V ARI, doado pela fábrica de cimento LafargeHolcim e, normatizado pela NBR 16697 (ABNT, 2018). A razão da escolha do CP V ARI foi o baixo percentual de adições, proporcionando uma influência mínima nos resultados para o ensaio de Expansibilidade por Reação Álcali-Agregado. A ficha técnica do cimento não foi fornecida pelo fabricante.

As Tabelas 3 e 4 apresenta as características físicas, mecânicas e químicas do cimento CP II Z-32, respectivamente, fornecidas pelo fabricante (mais detalhes encontram-se no Anexo A). Todas as características deste material atendem as normas brasileiras com relação ao limite mínimo de qualidade.

Tabela 3 - Caracterização física e mecânica do cimento

Característica	Normas	Unidade	Resultado	Exigências normativas
Índice de finura - #75 μm (n° 200)	NBR 11579 (ABNT, 2013)	%	0,33	$\leq 12,0$
Área Específica (Blaine)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	cm^2/g	5.362,31	≥ 2600
Água de consistência normal	NBR 16606 (ABNT, 2018)	%	29,18	Não se aplica
Início de Pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	min	247,30	≥ 60
Fim de Pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)	min	309,62	≤ 600
Expansibilidade a quente	NBR 11582 (ABNT, 2016)	mm	0,27	$\leq 5,0$
Resistência à compressão (7 dias)	NBR 7215 (ABNT, 2019)	MPa	29,23	$\geq 20,0$
Resistência à compressão (28 dias)	NBR 7215 (ABNT, 2019)	MPa	38,04	$\geq 32,0$ $\leq 49,0$

Fonte: Autora a partir de dados fornecidos pelo fabricante¹

Tabela 4 - Caracterização química do cimento

Característica	Normas	Unidade	Resultado	Exigências normativas
Perda ao fogo - PF	NBR NM 18 (ABNT, 2012)	%	8,05	$\leq 8,5$
Óxido de Magnésio - MgO	NBR NM 14 (ABNT, 2012)	%	2,02	$\leq 6,5$
Trióxido de Enxofre - SO_3	NBR NM 16 (ABNT, 2012)	%	2,78	$\leq 4,0$
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15 (ABNT, 2012)	%	11,45	$\leq 18,0$

Fonte: Autora a partir de dados fornecidos pelo fabricante¹

3.3.2 Agregados Convencionais

O agregado miúdo natural utilizado no programa experimental foi uma areia quartzosa, proveniente da jazida do Rio Sirinhaém - PE, e comumente comercializada no mercado da Região Metropolitana do Recife (RMR). Anteriormente à realização dos ensaios de caracterização e da moldagem dos corpos de prova, a areia passou um processo de secagem ao ar, até atingir a constância de massa, para que a umidade existente na areia não influenciasse nos resultados. Em seguida, realizou-se o peneiramento na peneira de abertura de malha 4,75 mm, descartando-se o material retido.

¹Votorantim Cimentos - Boletim de Ensaios de Cimento - CPII Z – 32 realizado em abril de 2019. O Boletim encontra-se no Anexo A.

O agregado graúdo utilizado foi a brita de origem granítica, obtido a granel no comércio local da Região Metropolitana do Recife. Com diâmetro máximo de 19 mm, optou-se pela Brita 01 devido ao seu grande uso na construção civil para a confecção de concretos estruturais. A brita chegou ao local de realização dos ensaios com poucas impurezas, que não viriam a influenciar nas propriedades do concreto.

Para avaliar as características dos agregados miúdos e graúdos convencionais (areia e brita), foram realizados, no Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM), procedimentos experimentais normatizados apresentados nos Quadros 7 e 8. As amostras utilizadas nesses ensaios foram obtidas seguindo a metodologia das normas NBR NM 26 (ABNT, 2009) e NBR NM 27 (ABNT, 2001) e observando as especificações dos agregados para concreto da NBR 7211 (ABNT, 2019).

Quadro 7 - Ensaios para caracterização do agregado miúdo

Ensaio	Normas
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máx. característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária no estado compactada (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa específica (kg/m ³)	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Índice de Volume de Vazios (%)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: Autora (2019)

Quadro 8 - Ensaios para caracterização do agregado graúdo

Ensaio	Normas
Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de Finura	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Dimensão máx. característica (mm)	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária no estado compactada (kg/m ³)	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: Autora (2019)

3.3.3 Água e Hidróxido de Sódio

Na produção do concreto foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA). A relação a/c utilizada foi de 0,55 e foi mantida fixa para todos os concretos. De acordo com a NBR 15900 (ABNT, 2009), a água de abastecimento público é adequada para uso em concreto, não havendo necessidade de se fazer ensaio com a água. Para a realização do ensaio de expansibilidade de barras de argamassa foi utilizado hidróxido de sódio disponível no mercado e água destilada.

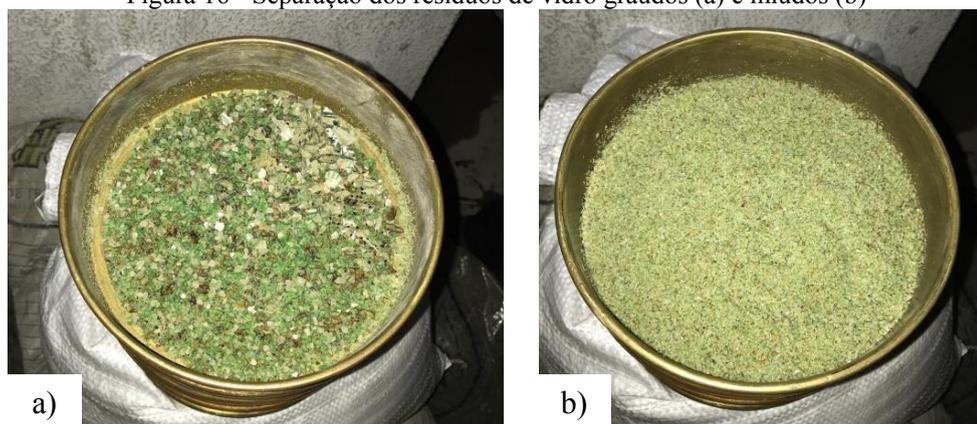
3.3.4 Resíduo de Vidro Moído

O resíduo de vidro utilizado neste trabalho foi cedido pela Usina de Tratamento de Resíduos Sólidos (UTRS), localizada no Arquipélago de Fernando de Noronha, estado de Pernambuco. Essa unidade recebe o vidro após a coleta seletiva feita na região, e processa o material através de um triturador mecânico. Para a moagem é utilizado qualquer tipo de vidro sodo-cálcico, porém existe uma maior concentração de garrafas long-neck. Depois de todo o procedimento de moagem o resíduo foi enviado, por meio de transporte marítimo, até o continente.

Apesar do resíduo de vidro ser resultante de um processo de triagem e trituração, não é feita uma lavagem e limpeza adequada do material antes da trituração. Por tanto, o resíduo foi recebido ainda com vestígios de lixo e um pouco de salinidade, devido a proximidade com o mar. Foi decidido utilizar o material nas condições de recebimento, com intuito de produzir um concreto simulando as condições reais que acontecem em obra de construção civil.

Devido a essas circunstâncias, o resíduo de vidro não foi lavado, sendo feita apenas secagem ao ar e separação dos grãos maiores que o desejado para a pesquisa. Para que o vidro pudesse se enquadrar na condição de agregado miúdo, equiparando-se com a espessura da areia comumente usada na fabricação de concreto, realizou-se o peneiramento na peneira de abertura 4,75 mm, descartando-se o material retido. A Figura 16 ilustra esse procedimento.

Figura 16 - Separação dos resíduos de vidro graúdos (a) e miúdos (b)



Fonte: Autora (2019)

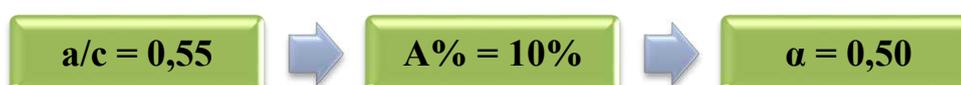
Para avaliar as características físicas do resíduo de vidro foram realizados os mesmos ensaios e metodologias usadas para a caracterização do agregado miúdo areia. Todos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM).

3.4 ETAPA 02 - DOSAGEM, PRODUÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

3.4.1 Dosagem dos Cilindros de Concreto

Foram preparados corpos de prova de concreto sem adição de resíduo de vidro (concreto referência), e corpos de prova com substituição parcial da areia pelo resíduo nas proporções de 15% e 30% em massa. As porcentagens foram definidas levando-se em consideração os trabalhos estudados na revisão bibliográfica, a qual mostrou que não é viável a utilização de porcentagens elevadas do resíduo de vidro na composição do concreto.

Para a dosagem do concreto referência foi calculado um traço com relação água/cimento (a/c), teor de água/materiais secos (A%) e teor de argamassa (α) com valores de:



A partir desses dados foi definido o traço unitário em massa para cimento (c), agregado miúdo (a), agregado graúdo (b) e relação a/c:

$$1 : 1,75 : 2,75 : 0,55$$

$$(c : a : b : a/c)$$

Para esse traço, e considerando o cimento utilizado com classe de resistência 32 MPa, estimou-se alcançar a resistência aos 28 dias do concreto de 25 MPa, atendendo a classe C25 do Grupo I para concreto estrutural e a Classe II quanto a agressividade ambiental, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Com base no traço do concreto referência foram produzidos outros 2 traços, realizando-se a substituição parcial, de 15% e 30% da areia pelo resíduo de vidro. Sendo assim, o experimento contou com um total de 3 famílias com diferentes proporções (REF, RV 15 e RV 30), cada uma com 34 corpos de prova (CP), totalizando 102 CP's, conforme ilustrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Definição das famílias e quantidade de corpos de prova

Família	% RV	Proporção (c:a:b)	Proporção (RV)	Relação a/c	Nº de CP's
REF	0%	1 : 1,75 : 2,75	0,00	0,55	34
RV 15	15%	1 : 1,49 : 2,75	0,26	0,55	34
RV 30	30%	1 : 1,23 : 2,75	0,52	0,55	34
Total					102

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 6 apresenta o quantitativo em quilogramas (Kg) dos materiais utilizados para a produção dos corpos de prova de cada família.

Tabela 6 - Quantitativo de materiais utilizados

Família	Nº de CP's	Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (ml)	RV (kg)
REF	34	24,70	43,22	67,92	13,58	0,00
RV 15	34	24,70	36,74	67,92	13,58	6,48
RV 30	34	24,70	30,26	67,92	13,58	12,96
Total	102	74,10	110,22	203,76	40,74	19,44

Fonte: Autora (2019)

Além disso, o consumo de cimento estimado para cada traço foi calculado levando em consideração a Equação (1).

$$C_c = \frac{1000 - ar\%}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{P}{\rho_{RV}} + \frac{b}{\rho_b} + x} \quad (1)$$

Onde:

C_c = consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m^3);

$ar\%$ = teor de ar incorporado/aprisionado por metro cúbico de concreto (%);

ρ_c = massa específica do cimento (kg/m^3);

a = proporção de areia utilizada no traço;

ρ_a = massa específica da areia (kg/m^3);

P = proporção de RV utilizado no traço;

ρ_{RV} = massa específica do RV (kg/m^3);

b = proporção de brita utilizada no traço;

ρ_b = massa específica da brita (kg/m^3); e

x = relação água cimento utilizada.

A Tabela 7 apresenta os consumos de cimento, areia, brita, água e, de RV das famílias REF, RV 15 e RV 30.

Tabela 7 - Consumo dos materiais utilizados

Família	Consumo de cimento (kg/m^3)	Consumo de areia (kg/m^3)	Consumo de brita (kg/m^3)	Consumo de água (kg/m^3)	Consumo de RV (kg/m^3)
REF	390,00	682,50	1.072,50	214,50	0,00
RV 15	390,00	581,10	1.072,50	214,50	101,40
RV 30	390,00	479,70	1.072,50	214,50	202,80

Fonte: Autora (2019)

É importante ressaltar que as proporções dos materiais dos concretos confeccionados em laboratório são uma tentativa de se chegar mais perto possível da realidade.

3.4.2 Confeção dos Cilindros de Concreto

A confecção do concreto foi realizada no LTM e de acordo com as indicações para procedimento de moldagem e cura de corpos de prova da NBR 5738 (ABNT, 2016).

Para a realização da mistura foi utilizada uma betoneira de eixo inclinado (Motomil MB-150P), com capacidade de 150 litros, foram realizadas 2 betonadas para cada traço. Os materiais foram previamente pesados com o auxílio de uma balança e inseridos na betoneira de acordo com a sequência ilustrada na Figura 17. A sequência de colocação dos materiais na betoneira se manteve constante para que fosse evitada a perda do material e a mistura ficasse mais homogênea.

Figura 17 - Sequência de inserção dos materiais na betoneira



Fonte: Autora (2019)

Com a betoneira desligada, foi inserido todo o agregado graúdo (brita) e parte da água. Em seguida, com a betoneira ligada, esse material foi misturado por aproximadamente 1 minuto, após esse momento foi acrescido o cimento, em sequência o agregado miúdo (nos traços com as substituições, o RV foi colocado na betoneira juntamente com a areia) e, por último foi adicionado o restante da água, Figura 18. A mistura seguiu por um período de 5 minutos após o acréscimo do último material.

Figura 18 - Mistura do concreto na betoneira



Fonte: Autora (2019)

Após o procedimento de mistura, foram realizados os ensaios do concreto no estado fresco (ver Item 3.5.1) e, em seguida iniciou-se a moldagem do concreto em formas cilíndricas com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, devidamente verificadas e untadas com óleo mineral para facilitar a retirada dos CP's após a secagem. Nas amostras destinadas aos ensaios de absorção de água por imersão e por capilaridade, as formas não foram untadas com óleo, conforme é sugerido nas NBR 9778 (ABNT, 2009) e NBR 9779 (ABNT, 2012).

O adensamento mecânico foi realizado com o auxílio de um vibrador de imersão, seguindo as instruções da NBR 5738 (ABNT, 2016), conforme ilustrado na Figura 19. Em seguida as amostras foram devidamente identificadas e armazenadas no laboratório durante o período de cura inicial de 24 horas, Figura 20.

Figura 19 - Adensamento mecânico



Fonte: Autora (2019)

Figura 20 - Corpos de prova moldados



Fonte: Autora (2019)

Após as 24 horas de cura ambiente os CP's foram desmoldados, identificados novamente e colocados em uma câmara úmida, Figuras 21 e 22. Sendo mantidos em solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) por 7 e 28 dias, respeitando as idades pré-determinadas para a realização dos ensaios mecânicos e de durabilidade do concreto.

Figura 21 - Corpos de prova na cura úmida



Fonte: Autora (2019)

Figura 22 - CP's em solução de cal



Fonte: Autora (2019)

Respeitando o tempo de cura estabelecido, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico por ondas ultrassônicas, absorção de água por capilaridade e absorção de água por imersão, de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 - Idade dos ensaios e quantidade de corpos de prova

ENSAIOS	IDADE	Número de corpos de prova por família		
		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Resistência à Compressão	7 dias	8	8	8
	28 dias	8	8	8
Resistência à Tração	7 dias	4	4	4
	28 dias	4	4	4
	148 dias	4	4	4
Absorção por Imersão	28 dias	3	3	3
Absorção por Capilaridade	28 dias	3	3	3
Módulo de Elasticidade por Ultra-Som	7 dias	Utilizar os mesmos CP's do ensaio de Compressão		
	28 dias			
Total		34	34	34

Fonte: Autora (2019)

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

3.4.3 Dosagem e Confeção das Barras de Argamassa

As argamassas confeccionadas para o ensaio de RAA, pelo método de avaliação da potencialidade reativa dos agregados através de barras de argamassa, foram produzidas no Laboratório da empresa privada de Tecnologia da Construção Civil, TECOMAT Engenharia.

Os procedimentos de fabricação, moldagem, traço, cura, relação a/c e número de corpos de prova seguiram os procedimentos da NBR 15577- 4 (ABNT, 2018). Foram moldadas três barras de argamassa para cada família (REF, RV 15 e RV 30), com dimensões de 25 x 25 x 285 mm, foi adotado o traço 1:2,25 (cimento: agregado) e a relação água/cimento 0,47. Para cada família utilizou-se o quantitativo de material indicado na Tabela 9.

Tabela 9 - Quantitativo de material das barras de argamassa

Família	Nº de Barras	Cimento (g)	Areia (g)	Água (ml)	RV (g)
REF	3	440,00	990,00	206,80	0,00
RV 15	3	440,00	841,50	206,80	148,50
RV 30	3	440,00	693,00	206,80	297,00
Total	9	1.320,00	2.524,50	620,40	445,50

Fonte: Autora (2019)

Para a confecção das barras, primeiramente, os agregados miúdos (areia e resíduo de vidro) foram submetidos ao peneiramento, a fim de se obter as quantidades específicas de cada fração por traço, como mostra na Tabela 10. Após esse processo se deu a lavagem em água corrente, para remover o pó aderido e as partículas finas do agregado e, em seguida, realizou-se a secagem em estufa das frações retidas nas várias peneiras.

Tabela 10 - Granulometria requerida de material para o ensaio

Peneiras	REF (0%)		RV 15 (15%)		RV 30 (30%)	
	Areia (g)	RV (g)	Areia (g)	RV (g)	Areia (g)	RV (g)
# 2,36mm	99,00	0,00	84,15	14,85	69,30	29,70
# 1,18mm	247,50	0,00	210,375	37,125	173,25	74,25
# 600µm	247,50	0,00	210,375	37,125	173,25	74,25
# 300µm	247,50	0,00	210,375	37,125	173,25	74,25
# 150µm	148,50	0,00	126,225	22,275	103,95	44,55
Total	990,00	0,00	841,50	148,50	693,00	297,00

Fonte: Autora (2019)

Realizou-se a mistura dos materiais de cada traço com o auxílio de uma argamassadeira. Após a mistura, iniciou-se a moldagem das argamassas nas formas, já devidamente montadas e untadas com óleo mineral para facilitar o desmolde. Os corpos de prova foram moldados em duas camadas com alturas aproximadamente iguais, realizando-se um adensamento com 20 golpes do soquete em cada camada. As Figuras 23 e 24 mostram a preparação na argamassadeira e a moldagem das barras de argamassa, respectivamente.

Figura 23 - Preparação na argamassadeira



Fonte: Autora (2019)

Figura 24 - Moldagem das barras



Fonte: Autora (2019)

3.5 ETAPA 03 - ENSAIOS NO CONCRETO

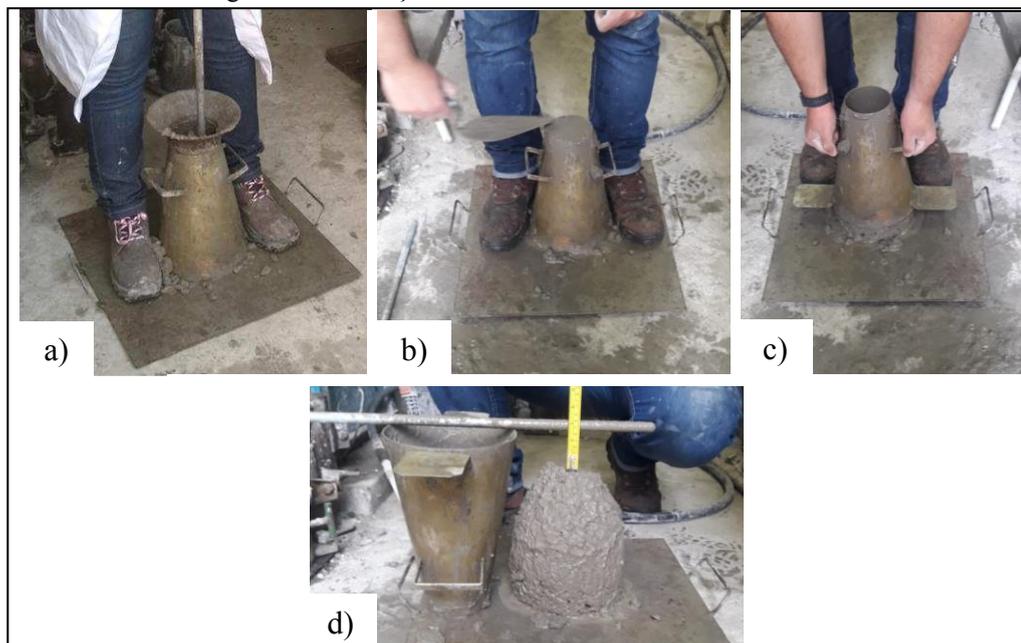
3.5.1 Propriedades Físicas do Concreto

Após a confecção do concreto na betoneira, foram avaliados o índice de consistência e a massa específica do concreto no estado fresco. Também foi possível calcular a massa específica do concreto endurecido por meio dos dados conseguidos no ensaio de absorção de água por imersão, obtendo dessa forma as massas específicas seca, saturada e real, após 28 dias de cura. Os respectivos ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM) da UNICAP, e todos os procedimentos foram repetidos para cada família de concreto produzida.

O ensaio do índice de consistência foi realizado através do método de abatimento do tronco de cone, o “slump-test”. O objetivo é avaliar a trabalhabilidade do concreto quanto a sua plasticidade e coesão.

Para a execução foram seguidas as diretrizes da NBR NM 67 (ABNT, 1998). Iniciou-se fazendo a molhagem de toda a aparelhagem utilizada no ensaio, em seguida preencheu-se o molde cônico com o concreto em três camadas com alturas aproximadamente iguais. Cada camada foi compactada manualmente, com 25 golpes da haste de compactação. Depois o molde foi retirado verticalmente, em movimento constante para não haver torções, e mediu-se o abatimento da amostra. A Figura 25 ilustra a sequência dos procedimentos do ensaio.

Figura 25 - Execução do ensaio de consistência do concreto



Fonte: Autora (2019)

O outro ensaio realizado com o concreto em estado fresco foi à determinação da massa específica aparente do concreto, a qual, se pode mensurar a quantidade de um agregado a partir do volume ocupado por ele, juntamente com os espaços vazios formados. Desta forma, foram realizados ensaios de acordo com a norma NBR 9833 (ABNT, 2009).

O ensaio consistiu em, preencher com concreto uma fôrma metálica de massa e volume conhecidos, adensar devidamente e pesar este recipiente. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada família, e calculada a média de cada família. Após isto, realizou-se o cálculo, subtraindo o peso da forma somado ao concreto pelo peso da forma vazia. Tendo obtido esse valor, fez-se a divisão pelo volume da forma, e assim, pode-se chegar ao resultado da massa específica aparente. O cálculo está representado na Equação (2).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} = massa específica aparente do concreto (kg/m³);

m = massa de concreto (kg); e

V = volume do recipiente (m³).

3.5.2 Propriedades Mecânicas do Concreto

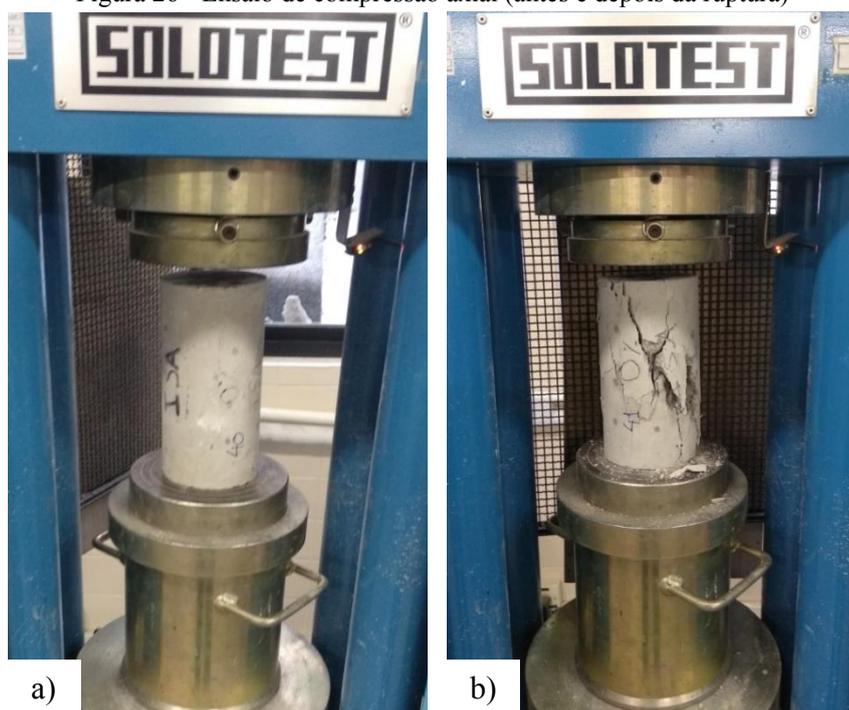
No estado endurecido foram avaliadas as principais propriedades mecânicas do concreto por meio dos ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico por ondas ultrassônicas. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais da UNICAP.

3.5.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

A resistência do concreto é imprescindível para garantir a qualidade da estrutura. Com o ensaio de resistência a compressão, pode-se avaliar a segurança e a estabilidade estrutural de uma futura edificação. Verificando se a resistência alcançada no ensaio é compatível com a prevista em projeto.

Para a execução do ensaio foram seguidas as diretrizes da NBR 5739 (ABNT, 2018). Os corpos de prova, aos 7 e 28 dias, foram submetidos a forças de compressão nas superfícies superior e inferior de cada corpo de prova até o instante da ruptura do material, de acordo com a Figura 26.

Figura 26 - Ensaio de compressão axial (antes e depois da ruptura)



Fonte: Autora (2019)

O procedimento foi realizado com auxílio de uma Prensa Elétrica Automotiva, com capacidade máxima de 200 tf, controle de velocidade automático e indicador digital. Os corpos de prova, já devidamente retificados e dimensionados, foram cuidadosamente centralizados no prato inferior da máquina e aplicada uma carga contínua até o momento do rompimento. Os resultados obtidos são apresentados, pela máquina, em kgf/cm^2 , e depois foram convertidos para Mega Pascal (MPa).

3.5.2.2 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração do concreto é muito pequena quando comparada à resistência à compressão, entretanto as tensões de tração não podem ser ignoradas, uma vez que a fissuração do concreto geralmente é resultante de uma ruptura à tração causada por retrações restringidas (SIMÕES, 2013). As fissuras, além de provocar danos estéticos, podem induzir a formação de falhas estruturais, ou a formação de canais para entrada de agentes agressivos que reduzem a durabilidade do concreto.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, também conhecido como “ensaio brasileiro”, foi realizado nos corpos de prova com idades de 7, 28 e 148 dias. Os CP's foram submetidos a forças até o instante da ruptura dos mesmos, conforme diretrizes da NBR 7222 (ABNT, 2011). De acordo com a Figura 27.

Figura 27 - Ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: Autora (2019)

A execução do ensaio foi conseguida com auxílio do mesmo equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão axial. Inicialmente os corpos de prova foram colocados de forma horizontal ao longo do prato da máquina, e apoiados entre duas ripas de madeira nas faces de contato entre eles. Posteriormente foi aplicada uma carga contínua, até o momento de ruptura. Os resultados obtidos também foram apresentados, pela máquina, em kgf/cm^2 , e depois convertidos para Mega Pascal (MPa).

3.5.2.3 Ensaio de Módulo de Elasticidade Dinâmico por Ultra- Som

O ensaio de ultra-som permite verificar a homogeneidade do concreto, eventuais falhas de concretagem, profundidade de fissuras e auxilia na execução do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico. O módulo de elasticidade trata da capacidade que um elemento construtivo tem de retornar à forma original, quando livre da carga que possa ter provocado um encurtamento (tração) ou alongamento (compressão) da estrutura (SALVADORI, 2011).

A metodologia utilizada para determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, seguiu o procedimento especificado pela NBR 8802 (ABNT, 2019). Por se tratar de um ensaio não destrutivo, foram utilizados os mesmos CP's que, posteriormente serviram para a concretização do ensaio de resistência à compressão axial, nas idades de 7 e 28 dias.

O equipamento utilizado foi o PUNDIT (aparelho de ultra-som portátil digital), que possui frequência de 54 kHz. Antes de começar o ensaio, o equipamento foi devidamente calibrado utilizando a barra de referência. Foi adotada a transmissão direta, com os transdutores acoplados em faces opostas dos corpos de prova, como ilustra a Figura 28.

Figura 28 - Ensaio de Ultra-som



Fonte: Autora (2019)

Os CP's foram retirados da cura e colocados verticalmente para secar ao ar por 1 hora, para que escoasse o excesso de água da superfície. Posteriormente, aplicou-se uma fina camada de vaselina nas superfícies planas dos transdutores, permitindo o acoplamento dos mesmos no corpo de prova. Registrou-se, então, o tempo em que a onda ultrassônica atravessa a distância entre os transdutores, permitindo calcular a velocidade através da Equação (3).

$$V = \frac{L}{t} \quad (3)$$

Onde:

V = velocidade de propagação da onda ultrassônica (mm/μs);
 L = altura do corpo de prova (mm); e
 t = tempo, em microssegundos (μs), necessário para a onda ultrassônica percorrer a distância L.

No Brasil ainda não existe uma norma para determinar o módulo de elasticidade dinâmico (E_d) do concreto. Entretanto, o E_d pode ser calculado, a partir do conhecimento desta velocidade, utilizando-se a expressão da Equação (4), indicada na ASTM C597 (2016).

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)} \quad (4)$$

Onde:

E_d = módulo de elasticidade dinâmico (GPa);

ρ = massa específica do concreto endurecido (kg/m^3);

V = velocidade de propagação da onda ultrassônica ($\text{mm}/\mu\text{s}$);

μ = coeficiente de Poisson, que foi considerado igual a 0,20, valor comumente encontrado na literatura.

3.5.3 Propriedades Relacionadas a Durabilidade

Nessa pesquisa foram abordadas algumas propriedades dos concretos, produzidos com e sem resíduo de vidro, que influenciam na durabilidade dos mesmos. Dentre elas, absorção de água por capilaridade, absorção de água por imersão e expansibilidade das barras de argamassa para averiguar a potencialidade reativa dos agregados.

3.5.3.1 Ensaio de Absorção de Água por Imersão

A absorção de água está intimamente relacionada com a permeabilidade do concreto, trata-se de um importante mecanismo de transporte dos agentes agressivos até o interior do concreto, sendo determinante na vulnerabilidade aos agentes externos.

O ensaio seguiu as determinações da NBR 9778 (ABNT, 2009), e foi realizado nos corpos de prova com idade de 28 dias. Todos os procedimentos foram desempenhados no Laboratório de Tecnologia de Materiais e no Laboratório de Química Geral e Inorgânica, ambos localizados na UNICAP.

Primeiro, com 28 dias de idade, os corpos de prova foram retirados da cura úmida, e realizada a aferição da massa com auxílio de uma balança. Posteriormente, os CP's foram encaminhados para secagem em estufa à uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$, por 72 horas. Após esse período, os CP's foram resfriados à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e, registrou-se suas massas secas.

Posteriormente, os CP's foram mantidos imersos em água à temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ por mais 72 horas. Passado esse tempo, os corpos de prova foram levados para o LQGI, onde foram colocados dentro de uma autoclave e progressivamente levados a ebulição, permaneceram nesse estado por um período 5 horas. A autoclave se manteve aberta durante todo o procedimento, como pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 29 - Ebulição dos CP's em autoclave



Fonte: Autora (2019)

Com a autoclave desligada, esperou-se o resfriamento da água até a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ e, registrou-se a massa saturada (m_{sat}) após a fervura. Também foi determinada a massa dos CP's saturados imersos em água (m_i), com auxílio de uma balança hidrostática.

Com esse ensaio foi possível calcular a absorção de água por imersão (A), o índice de vazios (I_V), e a massa específica real (ρ_r) dos CP's. Conforme as Equações (5), (6) e (7).

Absorção de água por imersão (expressa em porcentagem):

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (5)$$

Índice de vazios (expresso em porcentagem):

$$I_V = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} \times 100 \quad (6)$$

Massa específica real (expressa em g/cm^3):

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (7)$$

3.5.3.2 Ensaio de Absorção de Água por Capilaridade

A absorção de água por capilaridade é uma das propriedades mais importantes e determinantes na durabilidade do concreto. Visto que, esse mecanismo revela a intensidade da capacidade de um elemento construtivo resistir a migração de umidade, pelos poros capilares, até seu interior.

A avaliação da absorção de água por capilaridade foi realizada nos corpos de prova com idade de 28 dias. Para a execução do ensaio foram seguidas as diretrizes da NBR 9779 (ABNT, 2012), e todos os procedimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Materiais (LTM) da UNICAP.

Inicialmente, assim como no ensaio de absorção por imersão, os corpos de prova foram pesados logo após a retirada da cura úmida e colocados para secar em estufa à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$, durante 24 horas, sendo observada a constância de massa (Figura 30). Após esse período, os CP's foram retirados da estufa e resfriados à $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, foi determinada a massa seca (m_s) de cada CP.

Figura 30 - Secagem em estufa dos CP's



Fonte: Autora (2019)

Em seguida, os CP's foram posicionados sobre suportes de plástico dentro de um recipiente preenchido com água, até o nível de (5 ± 1) mm acima da face inferior dos CP's, de acordo com a Figura 31. Durante a permanência no recipiente, foram registradas as massas saturadas de cada CP com 3h, 6h, 24h, 48h e 72h, contadas a partir do momento que foram inseridos em contato com a água. Completada cada pesagem, os CP's retornavam imediatamente para o recipiente de ensaio, até a pesagem final.

Figura 31 - Ensaio de absorção por capilaridade



Fonte: Autora (2019)

Após a última aferição de massa, os CP's foram rompidos por compressão diametral, conforme NBR 7222 (ABNT, 2011), tornando-se possível conferir a distribuição de água no seu interior e, realização do cálculo para determinação da absorção de água por capilaridade. A distribuição da água no interior dos CP's pode ser visualizada na Figura 32.

Figura 32 - Distribuição de água no interior dos CP's



Fonte: Autora (2019)

3.5.3.3 Ensaio de Expansibilidade de Barras de Argamassa

A reação álcali-agregado é uma das manifestações patológicas mais severas que pode acontecer em estruturas de concreto. Basicamente consiste em uma reação química que ocorre entre os álcalis do cimento e alguns minerais presentes nos agregados. Quando essa reação acontece é produzido um gel reativo que em contato com umidade suficiente se expande no interior do concreto, vindo a ocasionar fissuras profundas e irreversíveis nas estruturas.

Para conhecer o potencial reativo do resíduo de vidro utilizado nesta pesquisa, foi realizado o ensaio de Barras de Argamassa pelo Método Acelerado (AMBT), executado de acordo com as recomendações da NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

Já tendo confeccionado e moldado as barras de argamassa (ver item 3.4.3), os moldes foram estocados em câmara úmida a uma temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ durante 24 horas. Após o tempo decorrido, as barras foram removidas dos moldes, identificadas e, foi feita a leitura orientativa com o auxílio de um comparador de mudança de comprimento. Em sequência, as barras foram imergidas, na posição vertical, em um recipiente de aço inox para um banho de água destilada com temperatura inicial de $23 ^\circ\text{C}$ até $80 ^\circ\text{C}$, onde permaneceram por mais 24 horas.

Posteriormente, as barras foram removidas do recipiente para a realização da leitura de variação de comprimento inicial. Depois da leitura, as barras foram novamente imersas em outro recipiente de aço contendo solução de hidróxido de sódio (NaOH) a uma temperatura de $80 ^\circ\text{C}$. Na Figura 33, pode-se observar as barras imersas na solução de NaOH.

Figura 33 - Barras de argamassa imersas em solução de NaOH



Fonte: Autora (2019)

As leituras obrigatórias de controle foram realizadas nas idades de 16 e 30 dias, conforme as prescrições normativas. Como forma de auxiliar o monitoramento das expansões, também foram feitas 5 leituras intermediárias antes dos 16 dias e mais 5 leituras antes dos 30 dias. Durante a espera para as medições obrigatórias e intermediárias as barras permaneceram na solução de NaOH. A Figura 34 apresenta uma das barras sendo medida com o auxílio do comparador de mudança de comprimento.

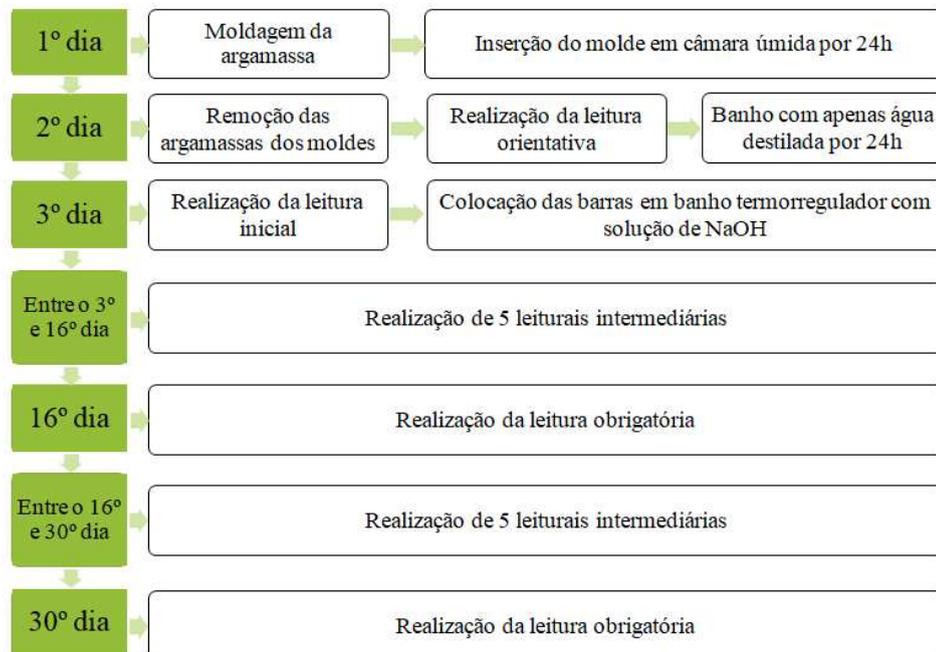
Figura 34 - Comparador de mudança de comprimento



Fonte: Autora (2019)

Na Figura 35, para facilitar o entendimento, encontra-se um esquema de todo o procedimento desde a confecção das barras de argamassa até a realização da última leitura obrigatória aos 30 dias de idade.

Figura 35 - Esquema do ensaio de RAA pelo método acelerado das barras de argamassa



Fonte: Autora (2019)

Tendo finalizado todas as etapas do ensaio, pôde-se chegar aos resultados de expansão das barras de argamassa e feita as devidas considerações sobre a reação álcali-agregado no material em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizados os ensaios descritos anteriormente, são apresentados neste capítulo os resultados obtidos, bem como suas análises e comparações dos comportamentos apresentados pelos diferentes concretos estudados. Análises estatísticas também foram realizadas a fim de obter um melhor entendimento dos resultados apresentados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

Os resultados obtidos na caracterização dos agregados convencionais e do agregado resíduo de vidro, são apresentados e analisados.

4.1.1 Agregados Convencionais

O ensaio de granulometria, realizado com auxílio de um peneirador mecânico, permitiu apresentar a composição granulométrica, o módulo de finura, a dimensão máxima característica e a classificação dos agregados (areia, brita e resíduo de vidro). Uma das razões para a especificação dessas propriedades é a influência na trabalhabilidade do concreto, sendo esta influência muito maior que na resistência mecânica.

Para a composição granulométrica do agregado miúdo (areia) foram analisadas duas amostras, cada uma com 300g, conforme a Tabela 11. A areia apresentou módulo de finura de 2,77 e dimensão máxima das partículas de 2,36 mm, classificando-se como agregado miúdo de granulometria média.

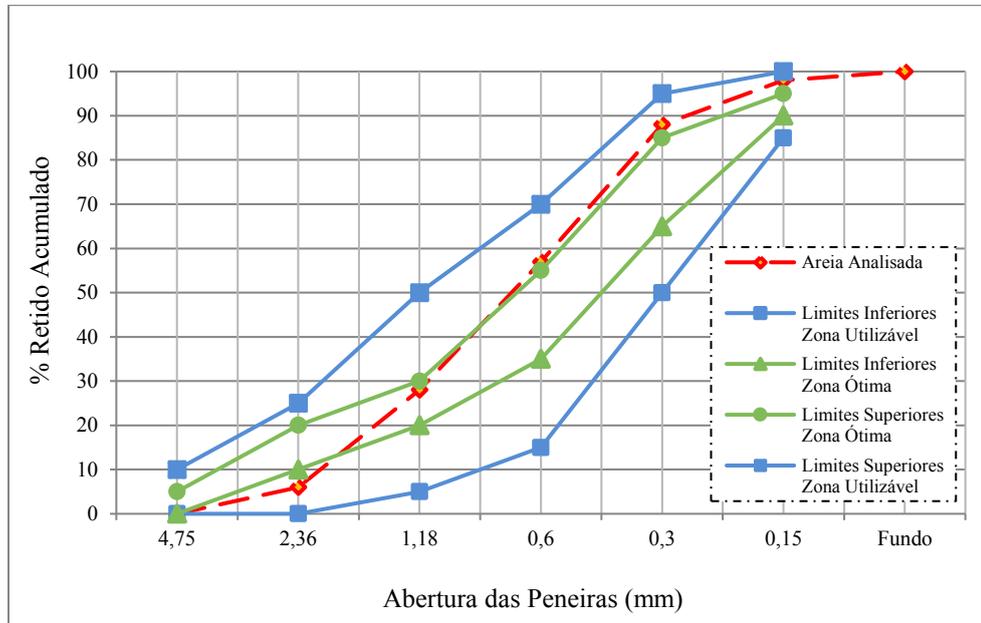
Tabela 11 - Granulometria da areia utilizada

Abertura Peneiras	Massa da amostra = 300 g			Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado (%)
	Peneiramento - Peso Retido (g)				
	Amostra 1	Amostra 2	Média		
4,75 mm	0,0	0,0	0,00	00	00
2,36 mm	15,9	18,2	17,0	06	06
1,18 mm	62,4	67,4	64,9	22	28
600 µm	85,4	90,2	87,8	29	57
300 µm	95,0	91,6	93,3	31	88
150 µm	32,4	27,2	29,8	10	98
Fundo	8,1	5,4	6,7	02	100
Total	299,2	300	299,5	100	277

Fonte: Autora (2019)

De acordo com a curva granulométrica, o agregado miúdo (areia) se situa dentro da zona utilizável, entre os limites inferior e superior, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). A curva granulométrica está representada na Figura 36.

Figura 36 - Curva granulométrica da areia utilizada



Fonte: Autora (2019)

Foram analisadas duas amostras, cada uma com 5.000 g, para a realização da composição granulométrica do agregado graúdo, conforme a Tabela 12. A brita apresentou módulo de finura de 6,97 e dimensão máxima das partículas de 19 mm, sendo classificada como Brita 1.

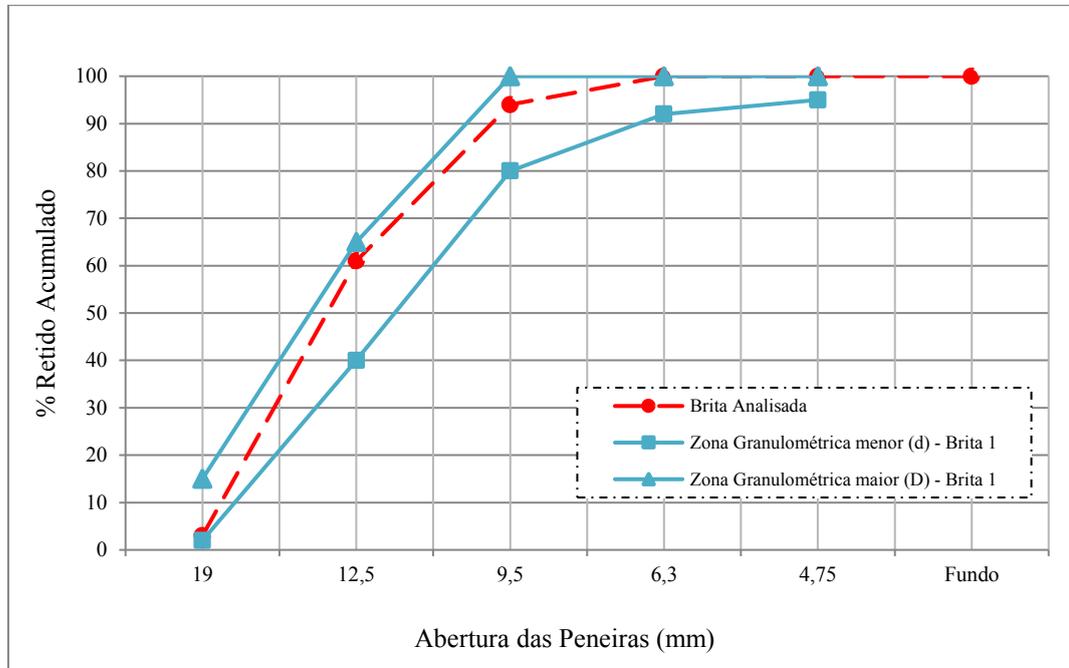
Tabela 12 - Granulometria da brita utilizada

Massa da amostra = 5.000 g					
Abertura Peneiras	Peneiramento - Peso Retido (g)			Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Média		
19,0 mm	160,6	101,2	130,9	3	3
12,5 mm	3.105,2	2.691,0	2.898,1	58	61
9,50 mm	1.511,6	1.810,8	1.661,2	33	94
6,30 mm	211,2	393,4	302,3	06	100
4,75 mm	0,0	0,0	0,0	00	100
2,36 mm	0,0	0,0	0,0	00	100
1,18 mm	0,0	0,0	0,0	00	100
600 µm	0,0	0,0	0,0	00	100
300 µm	0,0	0,0	0,0	00	100
150 µm	0,0	0,0	0,0	00	100
Fundo	0,0	0,0	0,0	00	100
Total	4.988,6	4.996,4	4.992,5	100	697

Fonte: Autora (2019)

De acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019), a brita utilizada se situa dentro da zona granulométrica d/D igual à 9,5/25, que corresponde à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo. Como pode ser visto na curva granulométrica apresentada na Figura 37.

Figura 37 - Curva granulométrica da brita utilizada



Fonte: Autora (2019)

Por meio de uma avaliação visual, observa-se que o agregado graúdo aparece na cor cinza e em sua maioria com formas cúbicas, angulares e com um mínimo de partículas lamelares, de acordo com Figura 38.

Figura 38 - Brita separada por tamanho



Fonte: Autora (2019)

Analisando as características granulométricas dos agregados convencionais, pode-se perceber uma evidência de materiais com boa distribuição granulométrica da areia e uma granulação mais uniforme da brita, características importantes para a produção do concreto.

A empregabilidade dos ensaios de massa unitária, massa específica e índice de volume de vazios nos agregados convencionais, foram analisados para fins de dosagem do concreto. Observa-se que os resultados, apontados na Tabela 13, apresentaram valores próximos dos encontrados normalmente na literatura.

Tabela 13 - Caracterização dos agregados convencionais

Ensaio	Areia	Brita
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.420 kg/m ³	1.300 kg/m ³
Massa unitária no estado compactada (kg/m ³)	1.490 kg/m ³	1.428 kg/m ³
Massa específica (kg/m ³)	2.600 kg/m ³	-
Índice de Volume de Vazios (%)	46%	-

Fonte: Autora (2019)

Todos os resultados das características dos agregados convencionais foram satisfatórios para a produção de concretos deste estudo.

4.1.2 Agregados de Resíduo de Vidro

Para a composição granulométrica do agregado de resíduo de vidro, também foram analisadas duas amostras, cada uma com 300 g, conforme a Tabela 14. O resíduo de vidro apresentou módulo de finura de 2,34 e dimensão máxima das partículas de 2,36 mm, classificando-se como agregado miúdo de granulometria média.

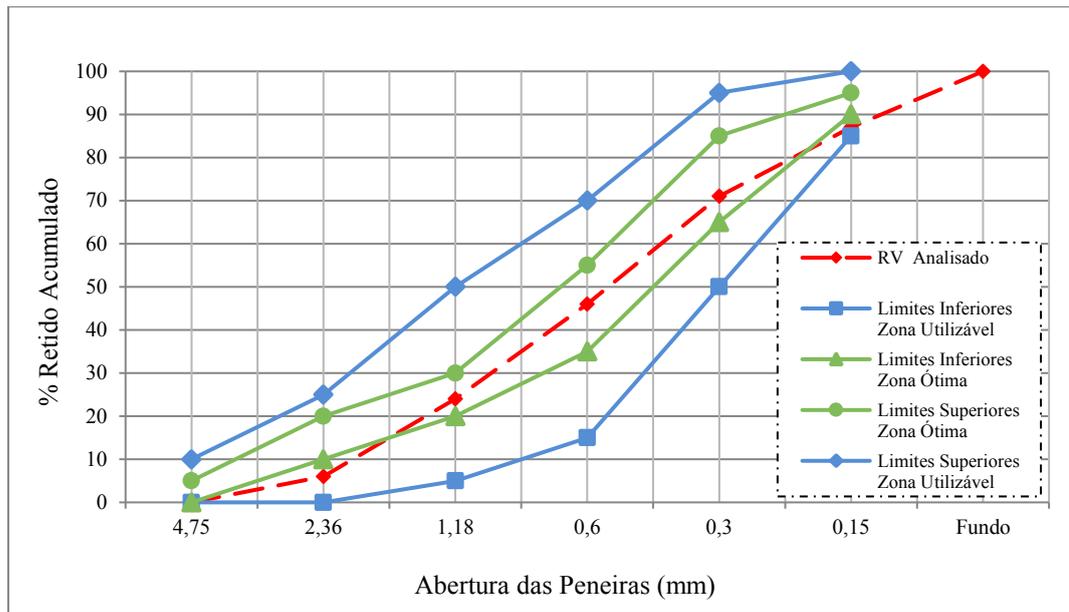
Tabela 14 - Granulometria do resíduo de vidro utilizado

Granulometria do Resíduo de Vidro					
Abertura Peneiras	Peneiramento - Peso Retido (g)			Percentual Retido (%)	Percentual Acumulado (%)
	Amostra 1	Amostra 2	Média		
4,75 mm	0,0	0,0	0,0	0	0
2,36 mm	18,8	18,9	18,8	6	6
1,18 mm	54,6	51,8	53,2	18	24
600 µm	67,6	66,8	67,2	22	46
300 µm	73,8	73,6	73,7	25	71
150 µm	46,7	49,2	47,9	16	87
Fundo	38,0	39,5	38,7	13	100
Total	300	300	300	100	234

Fonte: Autora (2019)

Devido a ausência de uma norma que trate de agregados reciclados, o resíduo de vidro foi analisado de acordo com as recomendações para agregados convencionais da NBR 7211 (ABNT, 2019). Sendo assim, a curva granulométrica do RV se situa entre a zona ótima dos limites superiores e a zona utilizável dos limites inferiores, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2019). A curva granulométrica está representada na Figura 39.

Figura 39 - Curva granulométrica do resíduo de vidro utilizado



Fonte: Autora (2019)

Percebe-se que a curva granulométrica do resíduo de vidro também apresenta uma evidência de materiais com granulometria contínua, mostrando-se uma importante característica para a produção do concreto.

Assim como nos agregados convencionais, também foram analisadas, para fins de dosagem do concreto, as propriedades de massa unitária, massa específica e índice de volume de vazios dos agregados de resíduo de vidro. Os resultados se encontram na Tabela 15.

Tabela 15 - Caracterização do agregado de resíduo de vidro

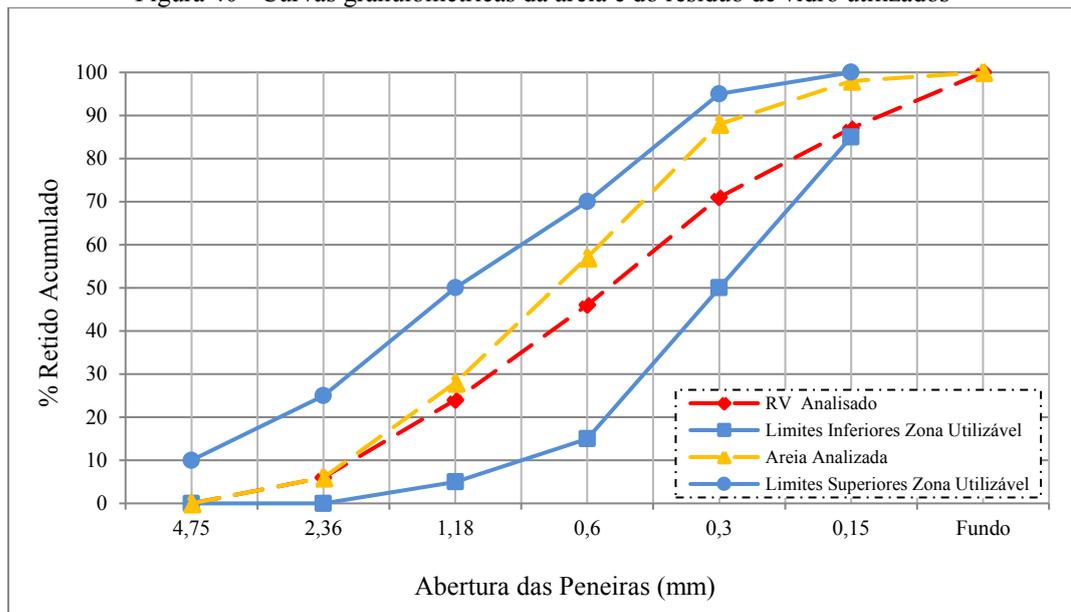
Ensaio	RV
Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.107 kg/m ³
Massa unitária no estado compactada (kg/m ³)	1.186 kg/m ³
Massa específica (kg/m ³)	2.500 kg/m ³
Índice de Volume de Vazios (%)	56%

Fonte: Autora (2019)

Observa-se que os resultados de massa unitária e massa específica do RV, são um pouco menores que os do agregado miúdo convencional. Consequentemente, o índice de volume de vazios se mostrou maior que o da areia utilizada nesta pesquisa.

Na Figura 40, as curvas granulométricas da areia e do resíduo de vidro apresentam um movimento de frequência contínua. E situam-se dentro da zona utilizável, entre os limites inferior e superior.

Figura 40 - Curvas granulométricas da areia e do resíduo de vidro utilizados



Fonte: Autora (2019)

Em relação ao material fino, observa-se que o agregado de RV apresenta mais finos que a areia utilizada, com 13% passando na peneira de abertura de malha de 150 μm , em comparação a 2% de areia.

Na análise visual dos agregados miúdos (areia e resíduo de vidro), constata-se que as partículas da areia são de cor marrom, esféricas e arredondadas, e as partículas do resíduo de vidro são esverdeadas e mais angulares e lamelares. Na Figura 41 as partículas são observadas de acordo com a abertura de malha das peneiras, em ordem decrescente 2,36 mm - 1,18 mm - 600 μm - 300 μm - 150 μm - fundo.

Figura 41 - Separação por tamanho das partículas de areia e RV



Fonte: Autora (2019)

4.2 PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO

Os resultados e discussões dos ensaios do índice de consistência e massa específica, para determinação das propriedades físicas dos concretos, são apresentados nessa seção.

4.2.1 Índice de Consistência

O ensaio de consistência foi executado pelo abatimento de tronco de cone, conforme recomenda a norma NBR NM 67 (ABNT, 1998), e classificados conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015). Ressalta-se que a relação a/c se manteve constante e não houve uso de aditivo plastificante em nenhum dos traços analisados. A Tabela 16 apresenta o comportamento dos concretos produzidos com relação à consistência, e a Figura 42 mostra o abatimento dos concretos no momento do ensaio.

Tabela 16 - Resultados do índice de consistência

Família	REF	RV 15	RV 30
Abatimento	75,5 mm	73,5 mm	40,5 mm
Classe de Consistência	S 50	S 50	S 10

Fonte: Autora (2019)

Verificou-se que a adição de RV interferiu consideravelmente na trabalhabilidade do concreto com substituição de 30%, já no concreto com substituição de 15% não houve grandes interferências, comparando-se com o concreto referência. Os valores obtidos representam uma redução de apenas 3% para a família RV 15 e de 46% para a família RV 30.

Figura 42 - Abatimento do concreto das famílias REF, RV 15 e RV 30, respectivamente



Fonte: Autora (2019)

Uma das possíveis causas da diminuição do abatimento das misturas de concreto contendo 30% de substituição da areia, deve-se ao formato angular e lamelar das partículas. Segundo Bauer (2013), as partículas arredondadas possibilitam mais plasticidade, enquanto que as angulares e lamelares determinam grande porcentagem de vazios no concreto.

Para Miranda Jr. (2012) as partículas lamelares vítreas no concreto são propícias a acumularem água sob elas, devido à exsudação interna do concreto, resultando em uma distribuição não homogênea da água de amassamento e no comprometimento da consistência do concreto fresco.

Outro fator causador da queda de consistência é a grande quantidade de finos encontrados no ensaio de granulometria do RV, em comparação à areia. Logo, a utilização de materiais muito finos, como é o caso dos resíduos de vidro, colaboram para o declínio da trabalhabilidade.

Segundo Miranda Jr. (2012) devido a elevada porcentagem de finos do agregado vítreo, uma maior quantidade de pasta de cimento adere nas partículas de vidro, reduzindo a quantidade de pasta de cimento disponível para a fluidez do concreto

Constatou-se então, que a trabalhabilidade apresentada pelos concretos de referência e da família RV 15 enquadraram-se dentro dos limites para um concreto de consistência fluida e coesa. Mesmo com o considerável declínio do abatimento da família RV 30, ainda foi possível obter uma trabalhabilidade suficiente para a moldagem dos corpos de prova.

Tendências semelhantes foram verificadas por boa parte das pesquisas estudadas no Capítulo 2, como por exemplo os achados em Adaway e Wang (2015), Ismail e Al-Hashmi (2009), Olofinnade et al. (2018), Shao et al. (2000), Shayan e Xu (2006), Singh et al. (2015), e Costa e Silva et al. (2011).

4.2.2 Massa Específica

O ensaio de massa específica nos diferentes traços de concreto, seguindo os processos descritos na NBR 9833 (ABNT, 2008), proporcionaram resultados muito próximos, de acordo com apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Massa Específica do concreto fresco

Família	Massa Específica (kg/m³)
REF	2.288
RV 15	2.257
RV 30	2.230

Fonte: Autora (2019)

Conforme foi mostrado na tabela, as misturas com resíduo de vidro apresentaram uma pequena diminuição no valor da massa específica em relação ao concreto de referência, em especial para a família RV 30.

Verificou-se um declínio pouco significativo, à medida que se aumenta o teor de resíduo de vidro, com variação de apenas 1% entre uma família e outra. Logo, a utilização do resíduo de vidro, nos percentuais adotados nessa pesquisa, não foi suficiente para alterar de forma determinante a massa específica.

Além da massa específica do concreto no estado fresco, também foi possível calcular a massa específica do concreto endurecido, por meio dos dados conseguidos no ensaio de absorção de água por imersão. A Tabela 18 apresenta os valores médios da massa específica (seca, saturada e real) do concreto após 28 dias de cura, ou seja, endurecido.

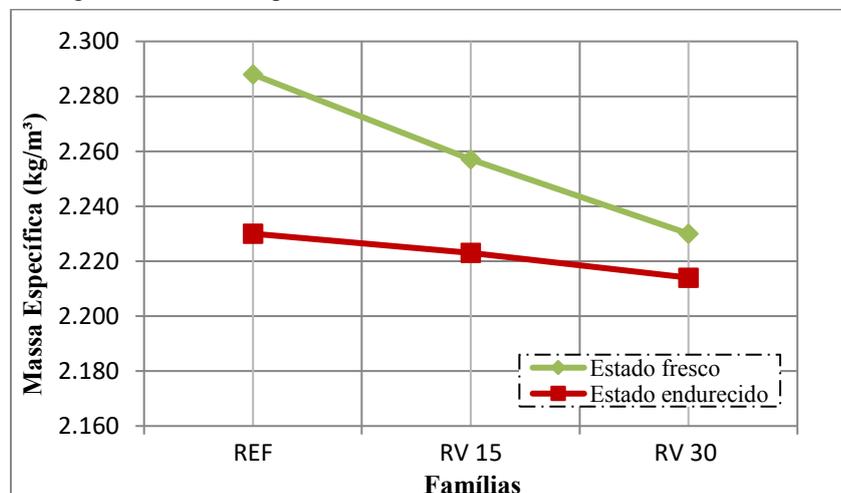
Tabela 18 - Massa Específica do concreto endurecido

Família	Massa específica seca (kg/m ³)	Massa específica saturada (kg/m ³)	Massa específica real (kg/m ³)
REF	2.230	2.368	2.586
RV 15	2.223	2.361	2.579
RV 30	2.214	2.354	2.575

Fonte: Autora (2019)

O concreto de referência obteve massa específica seca de 2.230 kg/m³, aos 28 dias, a substituição gradativa de 15% e 30% da areia por agregados de resíduo de vidro reduziu esse valor em menos de 1% em cada família. Essa redução dos valores de massa específica do concreto, fresco e endurecido, pode ser melhor observada no gráfico da Figura 43.

Figura 43 - Massa específica do concreto no estado fresco e endurecido



Fonte: Autora (2019)

Pode-se dizer que esse declínio (embora pouca significativo) das massas específicas das famílias RV15 e RV30 era esperado, devido a diferença de massa unitária entre o agregado areia e o agregado resíduo de vidro utilizado na composição dos traços.

Uma redução da massa específica, a medida que o teor de vidro aumenta, também foi constatada em grande parte da literatura, assim foi para Adaway e Wang (2015), Ismail e Al-Hashmi (2009), Malik et al. (2013), Miranda Jr. (2012) e Costa e Silva et al. (2011).

4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Para avaliação das propriedades mecânicas, os concretos no estado endurecido, foram submetidos a ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico por meio de ondas ultrassônicas. Os resultados individuais, de cada corpo de prova, bem como as análises estatísticas das amostras, estão melhor detalhados no Apêndice A desta dissertação.

4.3.1 Resistência à Compressão Axial

O ensaio foi realizado em 8 corpos de prova de cada família para cada idade de 7 e 28 dias, todos ensaiados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018). Os valores médios de resistência à compressão axial, e as análises estatísticas, para cada traço podem ser observados nas Tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias

Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	8	8	8
Média (MPa)	20,68	18,71	17,52
Desvio padrão (MPa)	1,06	1,34	0,56
Coefficiente de variação (%)	5,14	7,19	3,20
Erro padrão (MPa)	0,37	0,48	0,20
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	19,93	17,77	17,11
(limite inferior / limite superior)	21,40	19,63	17,89

Fonte: Autora (2019)

Tabela 20 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias

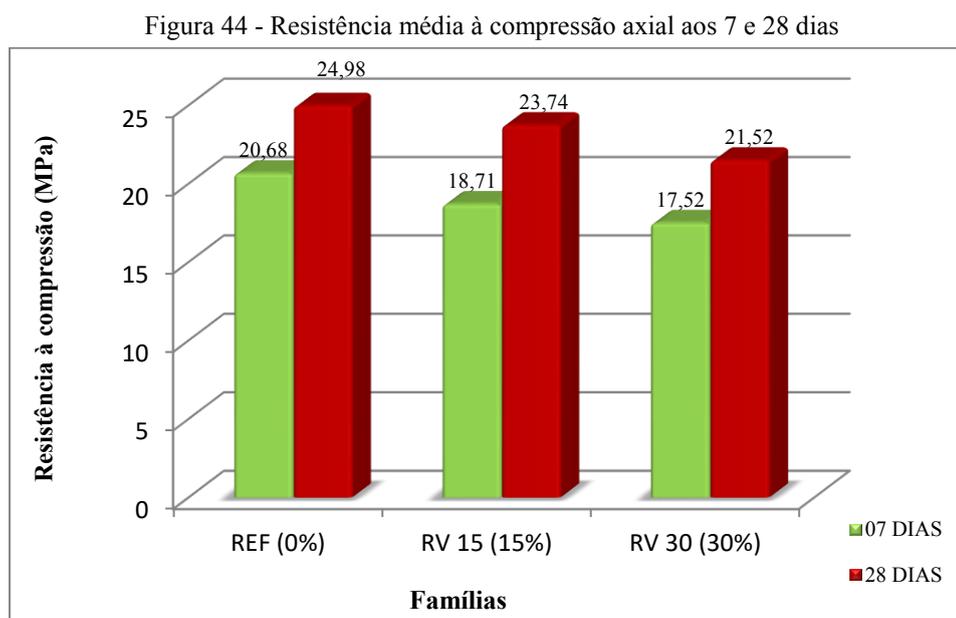
Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	8	8	8
Média (MPa)	24,98	23,74	21,50
Desvio padrão (MPa)	2,22	0,97	1,63
Coefficiente de variação (%)	8,87	4,08	7,58
Erro padrão (MPa)	0,78	0,34	0,58
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	23,44	23,07	20,37
(limite inferior / limite superior)	26,51	24,41	22,63

Fonte: Autora (2019)

Os concretos com substituição da areia pelo resíduo de vidro moído obtiveram resultados das médias de resistência à compressão inferiores ao concreto de referência. Constatou-se que o concreto de referência, aos 7 dias de idade, obteve um valor médio de 20,68 MPa, esse valor foi reduzido em 10% e 15% para as famílias RV15 e RV30, respectivamente. Aos 28 dias de idade, a resistência à compressão do concreto de referência foi de 24,98 MPa, coerente com o esperado na dosagem do traço (25 MPa), e esse valor foi reduzido em 5% e 15%, para as famílias RV15 e RV30.

A distribuição possui baixa² variabilidade, visto que o coeficiente de variação (COV) para todas as famílias e em todas as idades são menores que 10%. Quanto menor for o COV, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média.

A Figura 44 ilustra o gráfico dos resultados médios de resistência à compressão axial dos concretos estudados aos 7 e 28 dias.



Fonte: Autora (2019)

As Tabelas 21 e 22 apresentam a análise de variância (ANOVA) com intervalo de confiança de 95% utilizada para avaliar o efeito do uso do resíduo de vidro, entre as famílias REF, RV15 e RV30, para os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

² Pimentel-Gomes (2009) classifica os coeficientes de variação em: baixo ($COV < 10\%$), médio ($10\% < COV < 20\%$), alto ($20\% < COV < 30\%$) e muito alto ($30\% < COV$).

Tabela 21 - Análise de variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	40,13479	2	20,06739	18,72965	2,14E-05	3,4668
Dentro das famílias	22,4999	21	1,071424			
Total	62,63469	23				
Conclusão	Há variação significativa entre as famílias.					

Fonte: Autora (2019)

Tabela 22 - Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	49,3629	2	24,68145	8,871807	0,001611	3,4668
Dentro das famílias	58,4222	21	2,78201			
Total	107,7851	23				
Conclusão	Há variação significativa entre as famílias.					

Fonte: Autora (2019)

Os resultados das análises de variância apontam variação significativa entre as famílias tanto aos 7 como aos 28 dias. Para conferir quais famílias se diferem foi realizado o Teste de Tukey, que tem como base a DMS (diferença mínima significativa), calculada de acordo com a Equação (8).

$$DMS = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (8)$$

Onde:

DMS = diferença mínima significativa;

q = amplitude estudantizada ao nível de significância 95%;

QMR = quadrado médio dentro das famílias da análise de variância;

r = número de repetições de cada um dos grupos

De acordo com o Teste de Tukey, duas médias são estatisticamente diferentes, ao nível de significância de 95%, quando a diferença entre as médias das famílias for igual ou maior que o valor da DMS. As Tabelas 23 e 24 apresentam as análises estatísticas obtidas pelo Teste de Tukey entre as famílias para os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias.

Tabela 23 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 7 dias de idade

DMS (diferença mínima significativa) = 1,302824				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	20,68	18,71	1,97	SIM
REF x RV 30	20,68	17,52	3,16	SIM
RV 15 x RV 30	18,71	17,52	1,19	NÃO

Fonte: Autora (2019)

Tabela 24 - Teste de Tukey referente à comparação da resistência à compressão entre as famílias aos 28 dias

DMS (diferença mínima significativa) = 2,099347

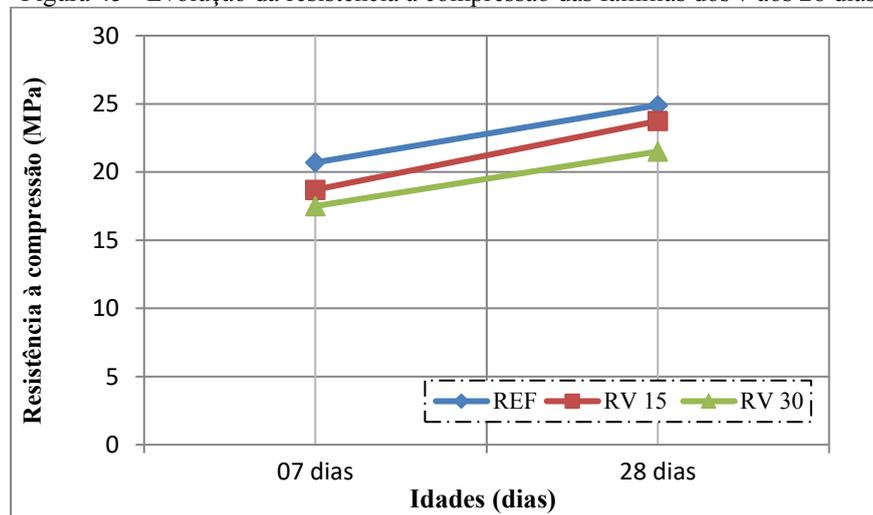
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	24,98	23,74	1,24	NÃO
REF x RV 30	24,98	21,50	3,48	SIM
RV 15 x RV 30	23,74	21,50	2,24	SIM

Fonte: Autora (2019)

Analisando os resultados da análise de variância e do Teste de Tukey, constatou-se que a variação dos valores de resistência à compressão para os concretos com substituição da areia pelo resíduo de vidro foi estatisticamente significativa aos 7 dias de idade entre as famílias REF e RV15 e entre REF e RV30, já entre as famílias RV15 e RV30 não houve diferença significativa. E aos 28 dias observa-se que estatisticamente não houve diferença significativa entre as famílias REF e RV15.

Na Figura 45 nota-se um crescimento contínuo e semelhante da resistência à compressão em todos os traços com o aumento do tempo de cura. Porém, a família RV15 apresentou um ganho de resistência de 27%, maior do que o aumento obtido pelas outras duas famílias. Esse fato pode justificar a diferença pouco significativa da análise de variância entre as famílias REF e RV15 aos 28 dias de idade.

Figura 45 - Evolução da resistência à compressão das famílias dos 7 aos 28 dias



Fonte: Autora (2019)

Através das análises, supõe-se que a diminuição da resistência média à compressão, verificada nos concretos produzidos com o resíduo de vidro, foi devido à baixa rugosidade e ao formato, angular e lamelar, das partículas de vidro. Visto que, segundo Mheta e Monteiro (2008), esses tipos de formatos podem influenciar as características da zona de transição na interface e, portanto, afetar a resistência do concreto.

Outro possível contributo para a diminuição da resistência, é o fato da resistência do vidro ser menor que a resistência dos agregados convencionais. Segundo a literatura, o vidro comum tem resistência em torno de 40 MPa e os agregados (areia e brita) tem resistência de 100 MPa. Porém, essa influência não é considerada por algumas literaturas como um fator determinante na resistência do concreto.

Os resultados obtidos tiveram uma disposição diversa aos resultados encontrados na maioria das pesquisas bibliográficas. A maioria dos autores alcançaram, até certo nível de substituição pelo resíduo de vidro, resistências à compressão mais elevadas que os concretos de referência. Como foi para Ismail e Al-Hashmi (2009), Gautam et al. (2012), Malik et al. (2013), Anusha e Reddy (2016), Miranda Jr. (2012), Olofinnade et al. (2018) e outros.

Entretanto, observou-se também que os resultados de Costa e Silva et al. (2011) apresentaram reduções semelhantes as que foram encontradas nesse trabalho, na qual se incidiu uma diminuição da resistência à medida que o resíduo de vidro é aumentado na composição do concreto. Contudo, apesar dos resultados de resistência das amostras contendo resíduo de vidro aparecerem inferiores ao do concreto de referência, as avaliações realizadas também indicaram desempenhos satisfatórios para a utilização do resíduo de vidro em substituição à areia natural, principalmente para os teores empregados com 50% de agregado de vidro (COSTA E SILVA ET AL., 2011).

Ressalta-se que o resíduo de vidro utilizado nesta dissertação e na pesquisa de Costa e Silva et al. (2011) são do mesmo tipo, vidro comum, e da mesma origem, cedidos pela Usina de Tratamento de Resíduos Sólidos, localizada no Arquipélago de Fernando de Noronha.

Uma diminuição da resistência à compressão também foi observada na pesquisa de Mageswari e Vidivelli (2010), porém, além da diminuição da resistência com o aumento do teor de vidro, os autores também observaram um decréscimo dos valores em idades mais avançadas.

4.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio foi realizado em 12 corpos de prova de cada família para cada idade de 7, 28 e 148 dias, todos ensaiados conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011). Os valores médios de resistência à tração por compressão diametral, e as análises estatísticas, para cada traço podem ser observados nas Tabelas 25, 26 e 27 e no Anexo A.

Tabela 25 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração aos 7 dias

Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	4	4	4
Média (MPa)	2,52	2,28	2,07
Desvio padrão (MPa)	0,07	0,18	0,31
Coeficiente de variação (%)	2,95	7,95	14,94
Erro padrão (MPa)	0,04	0,09	0,15
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	2,45	2,10	1,76
(limite inferior / limite superior)	2,59	2,46	2,37

Fonte: Autora (2019)

Tabela 26 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração aos 28 dias

Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	4	4	4
Média (MPa)	2,37	2,11	1,60
Desvio padrão (MPa)	0,27	0,20	0,47
Coeficiente de variação (%)	11,49	9,52	29,38
Erro padrão (MPa)	0,14	0,10	0,24
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	2,10	1,91	1,14
(limite inferior / limite superior)	2,63	2,30	2,06

Fonte: Autora (2019)

Tabela 27 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração aos 148 dias

Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	4	4	4
Média (MPa)	3,24	2,96	2,44
Desvio padrão (MPa)	0,27	0,24	0,21
Coeficiente de variação (%)	8,36	8,02	8,65
Erro padrão (MPa)	0,14	0,12	0,11
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	2,98	2,73	2,24
(limite inferior / limite superior)	3,51	3,19	2,65

Fonte: Autora (2019)

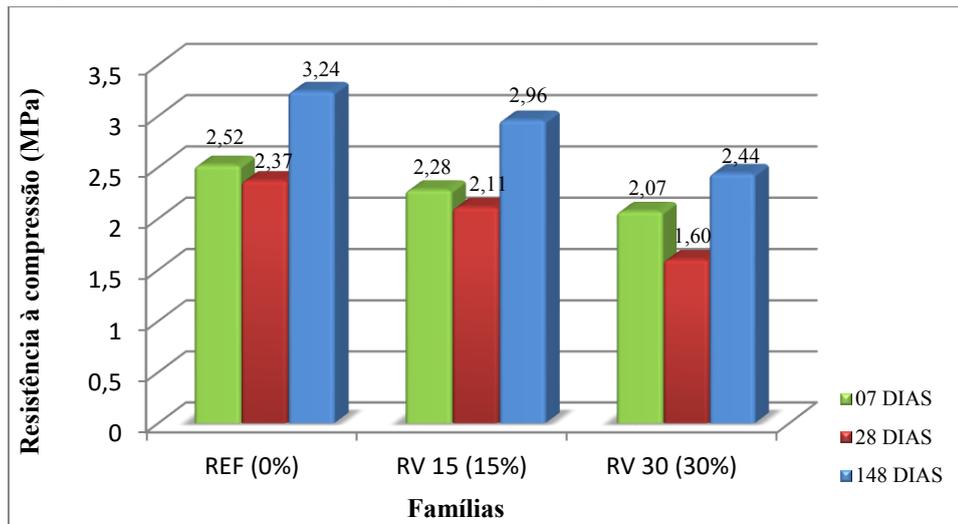
Os concretos com substituição da areia pelo resíduo de vidro moído obtiveram resultados das médias de resistência à tração inferiores ao concreto de referência. Constatou-se que o concreto de referência, aos 7 dias de idade, obteve um valor médio de 2,52 MPa, esse valor foi reduzido em 10% e 18% para as famílias RV15 e RV30, respectivamente. Aos 28 dias de idade, a resistência à tração do concreto de referência foi de 2,37 MPa, e esse valor foi reduzido em 11% e 32%, para as famílias RV15 e RV30. E aos 148 dias de idade, a resistência do concreto obteve valor de 3,24 MPa para o concreto referência, e uma redução de 9% e 25% para as famílias RV15 e RV30, respectivamente.

Nota-se que a distribuição possui grande variabilidade (dispersão), visto que o coeficiente de variação (COV) foram maiores que 10% para a família RV30, aos 7 dias de

idade, com 14,94%, e para as famílias REF e RV30, aos 28 dias, com 11,49% e 29,38%, respectivamente. Quanto maior for o valor do COV, mais heterogêneos serão os dados, ou seja, maior será a dispersão em torno da média.

A Figura 46 ilustra o gráfico dos resultados médios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos estudados aos 7, 28 e 148 dias.

Figura 46 - Resistência média à tração por compressão diametral aos 7, 28 e 148 dias

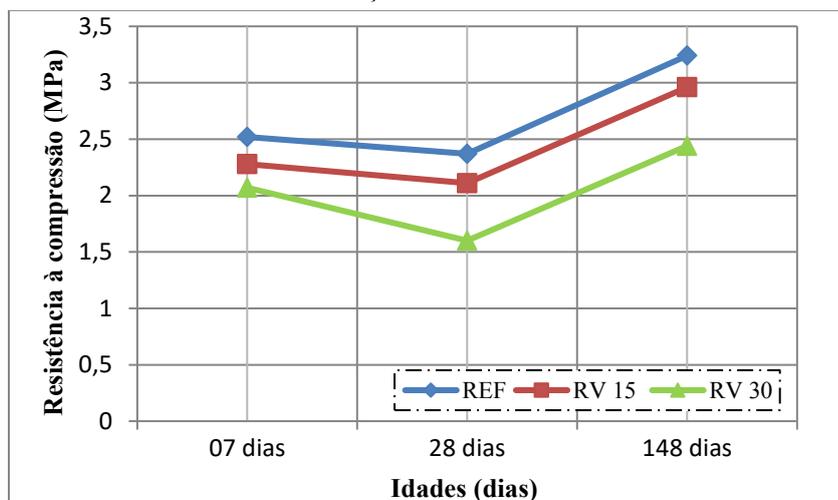


Fonte: Autora (2019)

Nota-se, no fator idade de ensaio dos concretos, que houve uma diminuição da resistência à tração aos 28 dias em todas as famílias. Devido a essa ocorrência, decidiu-se romper mais corpos de prova em idade mais avançada, aos 148 dias, para verificar se haveria uma tendência de diminuição da resistência. Contudo, ao se fazer o ensaio com 148 dias e comparando-se os resultados deste com os de 7 dias, constatou-se um aumento das resistências em 28%, 30% e 18% para as famílias REF, RV15 e RV30, respectivamente. Analisando esses fatos, juntamente com os dados do COV, é possível que os resultados aos 28 dias de idade tenham sofrido alguma alteração devido a possibilidade de variabilidade do método de ensaio, fazendo com que o mesmo saísse da linha de tendência.

Na Figura 47 pode-se observar melhor o efeito da interação entre a idade e o percentual de substituição sobre a resistência à tração das famílias dos 7 aos 148 dias. Constata-se um ganho de resistência maior, com relação a idade, para a família RV15 com um incremento de 30%, maior do que para as outras famílias que tiveram incremento de 28% para a família REF e 18% para RV30.

Figura 47 - Efeito da interação entre a idade e o percentual de substituição sobre a resistência à tração das famílias dos 7 aos 148 dias



Fonte: Autora (2019)

Por meio das análises, supõe-se que a diminuição da resistência média à tração, verificada nos concretos produzidos com resíduo de vidro, tiveram razões semelhantes às do ensaio de resistência à compressão. Desconfiando-se de que uma das causas da diminuição de resistência é a geometria das partículas de vidro, a qual pode ter prejudicado as propriedades da zona de transição e enfraquecido levemente a capacidade do concreto em resistir as forças de tensão.

Outro possível contributo para a diminuição da resistência pode estar atribuído ao aumento do índice de vazios, que conseqüentemente aumenta a porosidade e enfraquece a resistência. Os resultados do índice de vazios obtidos nesse experimento, podem ser encontrados no Item 4.4.1, mais a frente.

Nas pesquisas realizada por Mageswari e Vidivelli (2010), Malik et al. (2013), Olofinnade et al. (2018) e Ramasubramani et al. (2016), todos os resultados do ensaio de resistência à tração para os concretos contendo resíduos de vidro foram inferiores aos valores obtidos para os concretos de referência. Sendo observado uma tendência de declínio da resistência a medida que o teor de vidro aumenta.

4.3.3 Módulo de Elasticidade Dinâmico

Através do ensaio de ultrassom, realizado conforme a norma NBR 8802 (ABNT, 2019), foi possível determinar o módulo de elasticidade dinâmico das amostras produzidas. Nas Tabelas 28 e 29, estão os dados utilizados para o cálculo do módulo de elasticidade

dinâmico, juntamente com a média da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, aos 7 e 28 dias de idade das famílias produzidas.

Tabela 28 - Dados do ensaio de ultra-som aos 7 dias

Dados	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	8	8	8
Condição de umidade	úmido	úmido	úmido
Coefficiente de Poisson	0,20	0,20	0,20
Média Massa Específica do CP endurecido úmido (kg/m ³)	2.368	2.361	2.354
Média Velocidade de Propagação aos 07 dias (m/s)	4,79	4,54	4,52

Fonte: Autora (2019)

Tabela 29 - Dados do ensaio de ultra-som aos 28 dias

Dados	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	8	8	8
Condição de umidade	úmido	úmido	úmido
Coefficiente de Poisson	0,20	0,20	0,20
Média Massa Específica do CP endurecido úmido (kg/m ³)	2.368	2.361	2.354
Média Velocidade de Propagação (km/s)	4,82	4,42	4,25

Fonte: Autora (2019)

Por meio da média da velocidade de propagação de onda foi possível estimar a qualidade dos concretos produzidos. Levando-se em consideração a classificação³ apresentada por Cánovas (1998), constatou-se que, o concreto de referência aos 7 e 28 dias de idade e as famílias RV15 e RV30 aos 7 dias de idade, estão classificados com a velocidade maior que 4,5 km/s, considerados como de qualidade excelente. E as famílias RV15 e RV30 aos 28 dias de idade, foram classificadas como de qualidade ótima.

Os resultados do módulo de elasticidade, com as médias e as análises estatísticas, dos oito corpos de prova de cada família para cada idade de 7 e 28 dias, no estado endurecido úmido, estão apresentados nas Tabelas 30 e 31 e no Anexo A.

³ Classifica a qualidade do concreto em: excelente ($V > 4500$), ótimo ($3500 < V < 4500$), bom ($3000 < V < 3500$), regular ($2000 < V < 3000$) e ruim ($V < 2000$).

Tabela 30 - Análise estatística dos resultados do módulo de elasticidade aos 7 dias

Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Média Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d) (GPa)	49,02	43,89	43,38
Desvio padrão (GPa)	1,29	1,63	2,24
Coefficiente de variação (%)	2,63	3,72	5,17
Erro padrão (GPa)	0,46	0,58	0,79
Intervalo de confiança de 95% (GPa) (limite inferior / limite superior)	48,12 49,91	42,76 45,03	41,82 44,93

Fonte: Autora (2019)

Tabela 31 - Análise estatística dos resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias

Análise estatística do Módulo de Elasticidade Dinâmico aos 28 dias	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Média Módulo de Elasticidade Dinâmico (E_d) (GPa)	49,64	41,59	38,43
Desvio padrão (GPa)	2,43	1,82	1,73
Coefficiente de variação (%)	4,90	4,37	4,50
Erro padrão (GPa)	0,86	0,64	0,61
Intervalo de confiança de 95% (GPa) (limite inferior / limite superior)	47,95 51,32	40,33 42,84	37,23 39,63

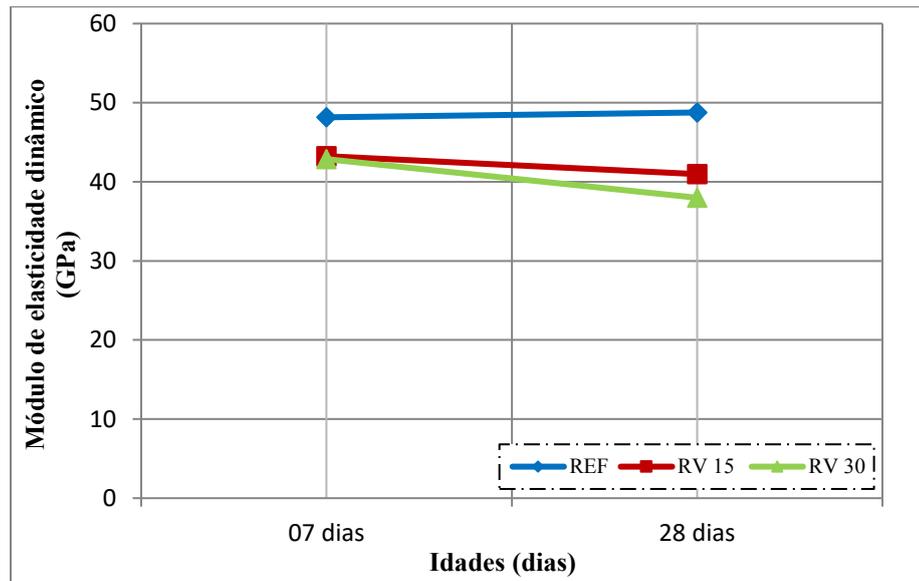
Fonte: Autora (2019)

Assim como no ensaio de compressão, observa-se um coeficiente de variação, para todas as famílias e em todas as idades, menor que 10%, valor muito baixo, representando a uniformidade entre os resultados das amostras de cada traço de concreto.

De modo geral, analisando-se as médias nas Tabelas 30 e 31, pode-se dizer que o módulo de elasticidade do concreto de referência foi maior que o encontrado nos concretos com resíduo de vidro. Constatou-se que o concreto de referência, aos 7 dias de idade, obteve um valor médio de 49,02 GPa, esse valor foi reduzido em 10% e 11% para as famílias RV15 e RV30, respectivamente. Aos 28 dias de idade, o módulo de elasticidade do concreto de referência foi de 49,64 GPa, e esse valor foi reduzido em 16% e 22%, para as famílias RV15 e RV30.

Os parâmetros estatísticos confirmam um crescimento pouco significativo do valor da média do módulo de elasticidade do concreto referência, com o avanço da idade. Entretanto, nesse mesmo aspecto, houve um declínio das médias dos módulos de elasticidade das famílias RV15 e RV30, de acordo com Figura 48. Com isso, é possível perceber que a presença do resíduo de vidro, influencia no módulo de elasticidade dinâmico, principalmente em idade avançada.

Figura 48 - Evolução do módulo de elasticidade das famílias dos 7 aos 28 dias



Fonte: Autora (2019)

Como a resistência à compressão é comumente relacionada com o módulo de elasticidade, decidiu-se analisar esta propriedade tanto separadamente quanto relacionada com o módulo de elasticidade. Como pode ser visualizado na Tabela 32.

Tabela 32 - Relação da resistência à compressão com o módulo de elasticidade

Famílias	07 dias de idade		28 dias de idade	
	Resistência à Compressão (Média em MPa)	Módulo de Elasticidade (Média em GPa)	Resistência à Compressão (Média em MPa)	Módulo de Elasticidade (Média em GPa)
REF (0%)	20,68	49,02	24,98	49,64
RV 15 (15%)	18,70	43,89	23,74	41,59
RV 30 (30%)	17,50	43,38	21,50	38,43

Fonte: Autora (2019)

Percebe-se que, com o avanço da idade, o módulo de elasticidade do concreto referência teve um pequeno crescimento com o aumento da resistência à compressão. Já nos concretos produzidos com resíduo de vidro, nota-se um comportamento diferente, o módulo de elasticidade tendeu a diminuir com o avanço da idade e aumento da resistência à compressão. Contudo, fica demonstrado, nos resultados deste trabalho, que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos não foram influenciados da mesma forma pelo tempo de cura.

Segundo Mheta e Monteiro (2008), os principais fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto são os tipos de agregados, matriz da pasta de cimento, zona de transição e parâmetros de ensaio. Dentre esses fatores, os que influenciaram em mudanças

significativas para cada mistura desta pesquisa foram os tipos de agregados e a zona de transição, pois os demais fatores foram mantidos constantes.

Ressalta-se, de acordo com Mheta e Monteiro (2008), que a resistência à compressão do concreto aumenta quando a matriz determina a resistência, entretanto, o módulo de elasticidade é reduzido, porque aumentos na microfissuração da zona de transição na interface afetam o comportamento tensão-deformação. Possivelmente, ocorreram microfissurações no interior dos concretos com RV devido ao formato e baixa rugosidade das partículas de vidro.

Pesquisas realizadas por Matos et al. (2016) e Simões (2013), sobre o resíduo de vidro na substituição parcial do cimento, verificaram que os módulos de elasticidade não indicaram diferenças significativas, quando comparados aos concretos de referência.

4.4 PROPRIEDADE DE DURABILIDADE DO CONCRETO

Para avaliação das propriedades de durabilidade, as amostras de referência e as com percentuais de resíduo de vidro, foram submetidos a ensaios de absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e, expansibilidade das barras de argamassa que avalia a reação álcali agregado. Os resultados individuais, de cada corpo de prova, bem como as análises estatísticas das amostras, estão melhor detalhados no Apêndice B desta dissertação.

4.4.1 Absorção de Água por Imersão

A Tabela 33 apresenta os resultados das médias e as análises estatísticas do índice de vazios e da absorção de água por imersão completa dos CP's, das famílias REF, RV15 e RV30. O ensaio foi realizado em três corpos de prova de cada família na idade de 28 dias, e seguiram as diretrizes da NBR 9778 (ABNT, 2009).

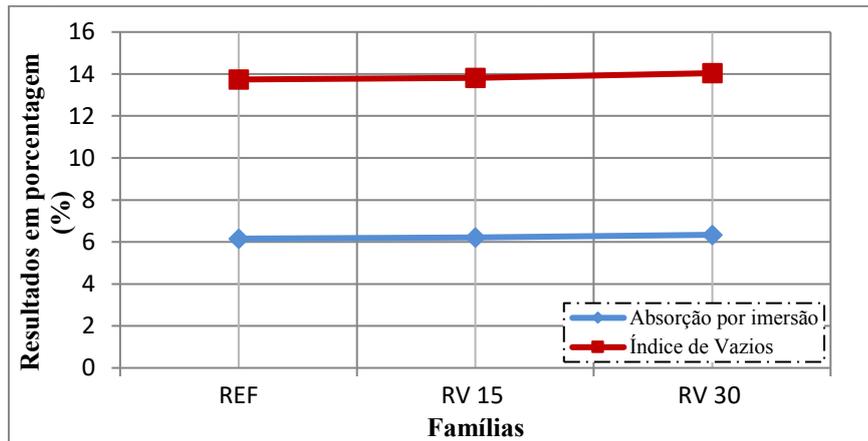
Tabela 33 - Análise estatística da absorção por imersão e do índice de vazios

Análise estatística	Absorção por Imersão			Índice de Vazios		
	REF	RV 15	RV 30	REF	RV 15	RV 30
Famílias						
Nº de CP's	3	3	3	3	3	3
Média (%)	6,16	6,22	6,34	13,74	13,82	14,04
Desvio padrão (%)	0,09	0,09	0,03	0,20	0,17	0,01
Coefficiente de variação (%)	1,46	1,47	0,42	1,43	1,23	0,08
Erro padrão	0,05	0,05	0,02	0,11	0,10	0,01
Intervalo de confiança de 95% (limite inferior / limite superior)	6,06 6,26	6,11 6,32	6,31 6,27	13,51 13,96	13,63 14,01	14,02 14,05

Fonte: Autora (2019)

Constatou-se que o concreto de referência, obteve um valor médio de absorção de água por imersão 6,16%, esse valor foi acrescido em apenas 1% e 3% para as famílias RV15 e RV30, respectivamente. Em relação ao índice de vazios, percebe-se que o concreto de referência obteve valor de 13,74%, e esse valor foi aumentado em 1% e 2%, para as famílias RV15 e RV30. Ou seja, nestas propriedades do concreto, as famílias não diferem significativamente, como pode ser visualizado na Figura 49 e na ANOVA do Apêndice B.

Figura 49 - Gráfico com as médias de absorção por imersão e índice de vazios

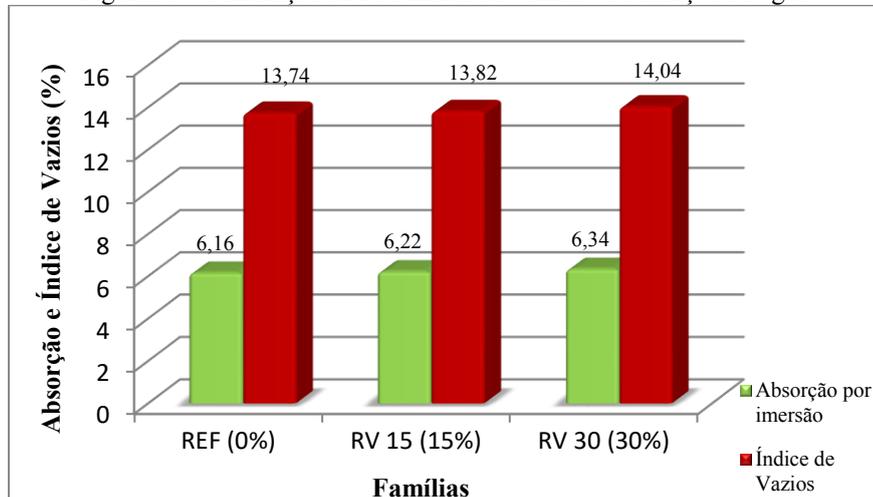


Fonte: Autora (2019)

Com o aumento do percentual de substituição da areia pelo resíduo de vidro, ficou constatado que houve um aumento pouco significativo nos valores médios de absorção por imersão e índice de vazios de todas as famílias, aos 28 dias de idade.

A Figura 50 apresenta uma correlação entre a diminuição no índice de vazios e uma consequente menor absorção de água, devido à diminuição na porosidade do material.

Figura 50 - Correlação entre o índice de vazios e a absorção de água



Fonte: Autora (2019)

Assim como da pesquisa de Miranda Jr. (2012), o comportamento da absorção de água por imersão foi coerente com o comportamento do índice de vazios. A relação entre o índice de vazios e a absorção está coerente com o esperado, visto que, segundo Mheta e Monteiro (2008), no concreto a permeabilidade é influenciada pelo volume e pela conectividade dos poros (vazios) na matriz da pasta de cimento. Justificando assim, o aumento da absorção de água associado ao aumento do índice de vazios.

De acordo com Mheta e Monteiro (2008), a resistência do concreto e a permeabilidade estão relacionadas entre si através da porosidade. Devido a este fato, os fatores que influenciaram a resistência também influenciaram a absorção de água das famílias estudadas neste trabalho.

4.4.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção capilar foi realizado de acordo com os procedimentos descritos na NBR 9779 (ABNT, 2012), em concretos com 28 dias de idade. Foram ensaiados três corpos de prova para cada família, com medições realizadas a cada 3, 6, 24, 48 e 72 horas, sendo os valores médios obtidos para absorção na última medição, em 72 horas, apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Análise estatística da absorção por capilaridade as 72 horas

Análise estatística	Absorção Capilar		
	REF	RV 15	RV 30
Famílias			
Nº de CP's	3	3	3
Média da altura da distribuição capilar (cm)	5,23	5,76	4,56
Média (g/cm²)	0,69	0,67	0,64
Desvio padrão (g/cm ²)	0,20	0,09	0,04
Coefficiente de variação (%)	28,76	12,89	6,53
Erro padrão (g/cm ²)	0,11	0,05	0,02
Intervalo de confiança de 95% (g/cm ²) (limite inferior / limite superior)	0,47 0,92	0,57 0,77	0,59 0,69

Fonte: Autora (2019)

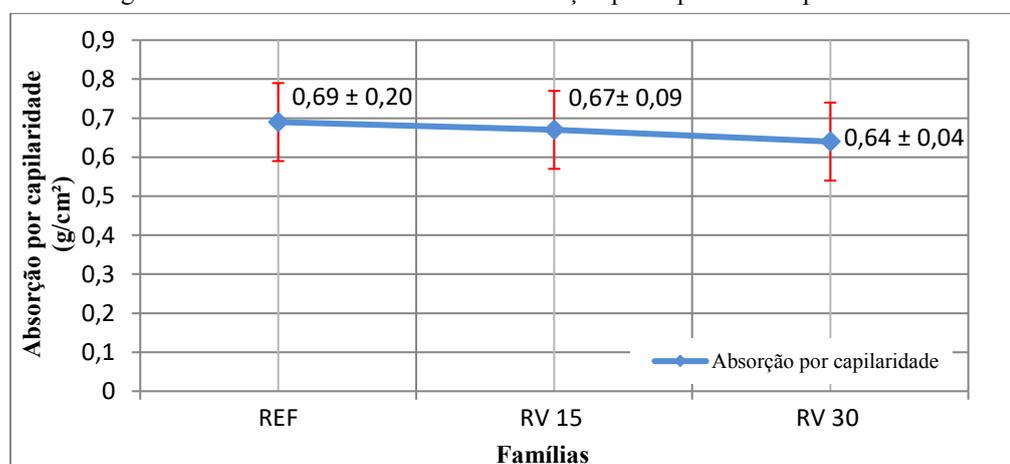
Ao contrário do que foi constatado no ensaio de absorção por imersão, a família com maior absorção de água por capilaridade foi a do concreto de referência e a família com menor absorção de água por capilaridade foi a RV30. Entretanto, nota-se que a média da absorção capilar de todas as famílias são muito similares, não havendo alteração significativa.

O concreto de referência obteve uma absorção capilar de $0,69 \text{ g/cm}^2$, percebe-se uma leve diminuição da absorção, 3% e 7%, à medida que são substituídos 15% e 30% do agregado miúdo areia pelo agregado de resíduo de vidro. Resultados semelhantes foram obtidos na pesquisa de Matos et al. (2016), com o aumento do teor de resíduo de vidro, a absorção de água capilar também diminuiu.

Foi observado, um coeficiente de variação das famílias REF e RV15, maiores que 10%, significando menos uniformidade entre os resultados das amostras. Diferente do que aconteceu com o coeficiente de variação da família RV30, que teve valor de 6,53%, demonstrando uma uniformidade maior que as outras famílias. Devido a essa ocorrência, faz-se necessário uma repetição do ensaio para uma maior confiabilidade dos dados.

O gráfico, apresentado na Figura 51, demonstra os resultados das médias e desvios padrão do ensaio de absorção de água por capilaridade. Observa-se de acordo com o gráfico uma tendência do resíduo de vidro, principalmente em teores maiores, provocarem uma diminuição da absorção capilar.

Figura 51 - Gráfico com as médias de absorção por capilaridade após 72 horas



Fonte: Autora (2019)

4.4.3 Expansibilidade de barras de argamassa

O ensaio de expansibilidade das barras de argamassa pelo método acelerado foi executado conforme recomenda a NBR 15577- 4 (ABNT, 2018), e os resultados foram classificados quanto a potencialidade reativa do agregado de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018). Os resultados individuais de cada corpo de prova estão melhor detalhados no Apêndice C desta dissertação.

A Tabela 35 apresenta os valores em porcentagem das médias da variação de comprimento, dos três corpos de prova de cada família, para cada idade avaliada até os 30 dias de idade. Segundo a NBR 15577-1 (2018), o agregado pode ser classificado como potencialmente reativo, em relação ao acontecimento da reação álcali-agregado, quando aos 30 dias de idade a expansão das barras de argamassa for igual ou superior ao limite de 0,19% de expansão.

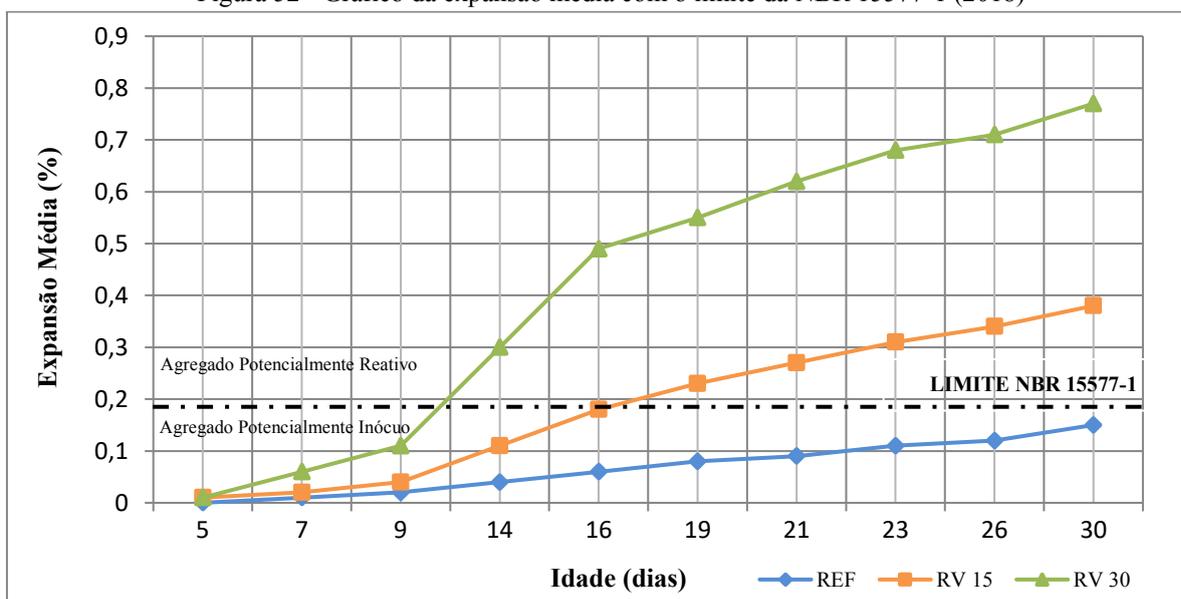
Tabela 35 - Expansão média das barras de argamassa

Idade em dias	Expansão Média (%)		
	REF	RV 15	RV 30
5	0,00	0,01	0,01
7	0,01	0,02	0,06
9	0,02	0,04	0,11
14	0,04	0,11	0,30
16	0,06	0,18	0,49
19	0,08	0,23	0,55
21	0,09	0,27	0,62
23	0,11	0,31	0,68
26	0,12	0,34	0,71
30	0,15	0,38	0,77

Fonte: Autora (2019)

O gráfico da Figura 52 mostra as expansibilidades das famílias analisadas em relação às suas idades, como também o limite estabelecido pela norma para determinação da reatividade do agregado.

Figura 52 - Gráfico da expansão média com o limite da NBR 15577-1 (2018)



Fonte: Autora (2019)

Os resultados indicam que as amostras com resíduo de vidro, presente nas famílias RV15 e RV30, apresentam expansão aos 30 dias de idade superior ao limite de 0,19%. Entretanto, mesmo com expansões acima do limite recomendado pela norma, as barras de argamassa não apresentaram fissuração e exsudação de gel ao final do ensaio. Por outro lado, os resultados dos ensaios da família de referência (sem resíduo de vidro), evidenciaram expansão inferior a 0,19%, sendo a areia considerada potencialmente inócua.

Observa-se que a família RV15 ultrapassou o limite dos 0,19% um pouco depois de atingir os 16 dias de idade, e obteve expansão média aos 30 dias de 0,38%, classificando-se como potencialmente reativo grau R1⁴. Já a família RV30 ultrapassou o limite quando ainda estava entre 9 e 14 dias de idade, e obteve expansão média aos 30 dias de 0,77%, valor considerado alto, sendo classificado como potencialmente reativo grau R3.

Os resultados de expansão das barras de argamassa, com as médias e as análises estatísticas, dos 3 corpos de prova de cada família (REF, RV15 e RV30), para a idade de 30 dias, estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Análise estatística dos resultados de expansão aos 30 dias

Análise estatística	REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Nº de CP's	3	3	3
Média (%)	0,15	0,38	0,77
Desvio padrão (%)	0,00	0,00	0,00
Coeficiente de variação (%)	0,38	0,15	0,00
Erro padrão (%)	0,00	0,00	0,00
Intervalo de confiança de 95% (%)	0,15	0,38	0,77
(limite inferior / limite superior)	0,15	0,39	0,77

Fonte: Autora (2019)

A distribuição para a expansão aos 30 dias possui baixa variabilidade, visto que o coeficiente de variação (COV) para todas as famílias são menores que 10%. Quanto menor for o COV, mais homogêneos serão os dados, ou seja, menor será a dispersão em torno da média, e dessa forma evidencia-se a confiabilidade da amostra.

⁴ A NBR 15577-1 (ABNT, 2018), classifica o grau de reatividade da expansão (exp) das barras de argamassa aos 30 dias em: R0 (exp < 0,19%), R1 (0,19% < exp < 0,40%), R2 (0,41% < exp < 0,60%), R3 (0,60% < exp).

Como as famílias RV15 e RV30 apresentaram expansões superiores a 0,19% aos 30 dias, o resíduo de vidro se apresentou como potencialmente reativo. O agregado considerado reativo é aquele cuja a fase mineralógica contenha sílica amorfa, ou seja, não apresentam organização cristalina dos minerais. Portanto, a potencialidade reativa para reação álcali-agregado das famílias com resíduo de vidro já era esperada, devido a grande quantidade de sílica amorfa presente na composição química do vidro.

Além disso, tomando-se como base os estudos realizados na revisão bibliográfica, entende-se que tamanhos maiores das partículas do resíduo de vidro também podem influenciar na ocorrência da expansão deletéria. Visto na literatura, que a dimensão das partículas de vidro pode inibir a RAA quando em tamanho suficiente para desenvolver atividade pozolânica.

Segundo Sanches (2008), a RAA ocorre quando a sílica é envolvida pelo hidróxido de cálcio dissolvido a partir dos álcalis dos cimentos Portland, atacando os pontos mais fracos do concreto, poros e superfície dos agregados. Se o concreto produzido tiver em sua composição um cimento com teor de álcali suficiente e o agregado utilizado for classificado como reativo, já com a água de amassamento se forma um gel reativo. E o que vai fazer com que a expansão álcali-agregado se processe é o ambiente úmido, ou seja, o gel reativo em contato com a umidade aumenta de volume e provoca a expansão. Como o concreto é um material poroso, até certo tempo de atuação o gel irá preencher os vazios existentes e só depois começará a exercer pressão sobre a massa do concreto e ocasionar as fissuras.

De acordo com a literatura, as expansões provocadas por RAA podem comprometer seriamente as propriedades mecânicas do concreto e conseqüentemente sua durabilidade. Dentre as propriedades mecânicas, o módulo de elasticidade e a resistência à tração são geralmente mais afetadas que a resistência à compressão.

É importante mencionar que o processo de expansão da RAA não tem um tempo determinado para acontecer (1 ano, 10 anos, 20 anos...), ou se realmente irá acontecer, pois existem inúmeros fatores que podem interferir na reação e que devem ser estudados e analisados. Como por exemplo, o tamanho do grão do agregado reativo, o teor de óxidos alcalinos do cimento, o tipo de estrutura, e as condições de exposição quanto à umidade e temperatura.

Portanto uma série de cuidados especiais devem ser tomados, a NBR 15577-1 (2018) recomenda, nos casos de potencialidade reativa do agregado no ensaio acelerado de barras de argamassa, que seja realizado o ensaio de longa duração dos prismas de concreto, descrito na NBR 15577- 6 (2018), para a confirmação dos resultados. Além do ensaio de longa duração, atualmente existe um ensaio acelerado dos prismas de concreto, normatizado pela NBR 15577-7 (2018). Em nota, a NBR 15577-1 (2018) ainda diz que, muitos casos em que os agregados se apresentaram como potencialmente reativos no ensaio das barras de argamassa, aparecem como inócuos no ensaio dos prismas.

Além da realização do ensaio dos prismas de concreto, a NBR 15577-1 também indica que se avalie a mitigação da expansão conforme o grau de risco de ocorrência, a classe de estrutura e as medidas preventivas. Como medida de prevenção, a NBR 15577-5 propõe, entre outras medidas, a combinação de sílica ativa e metacaulim a qualquer tipo de cimento Portland, sendo observadas as condições e submetendo-se a novos ensaios de expansão para comprovar a eficácia da medida de mitigação adotada.

A maior parte dos trabalhos estudados na bibliografia tiveram resultados opostos aos obtidos nesta dissertação, porém a maior parte dos pesquisadores fizeram a substituição do cimento pelo resíduo de vidro, na qual adotaram partículas muito finas de resíduo para que o efeito pozolânico pudesse acontecer.

Resultados de expansão semelhantes foram encontrados apenas na pesquisa de Taha e Nounu (2008), os quais concluíram que a presença do resíduo de vidro, só como substituto do agregado miúdo de areia nos concretos, provoca um elevado risco de deterioração pela expansão da reação álcali-agregado. Entretanto, se o resíduo também for adicionado em partículas muito finas na substituição do cimento, a expansão será reduzida para abaixo do nível estipulado em norma. Os autores também constataram que o Nitrato de Lítio pode ser usado como aditivo para inibição da expansão da RAA.

4.5 AVALIAÇÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Os principais resultados das propriedades físicas obtidos nos ensaios de abatimento e massa específica, e os principais resultados dos ensaios mecânicos e de durabilidade, encontram-se reunidos nas Tabelas 37 e 38, respectivamente. São apresentados nas tabelas os resultados do concreto referência, as proporções de aumento/diminuição que ocorreram nas famílias com resíduo de vidro e os coeficientes de variação.

Tabela 37 - Principais resultados das propriedades físicas

Principais Resultados Obtidos		
Famílias	Abatimento (mm)	Massa Específica Seca (kg/m ³)
REF (0%)	75,5 mm	2.230 kg/m ³
RV 15 (15%)	↓ 3%	↓ 1%
RV 30 (30%)	↓ 46%	↓ 1%

↓↑ Porcentagem de aumento (↑) ou redução (↓) em relação ao valor de referência.

Fonte: Autora (2019)

Tabela 38 - Principais resultados das propriedades mecânicas e de durabilidade

Principais Resultados Obtidos							
Principais Ensaios	Idade (dias)	Médias dos resultados			Coeficiente de variação (%)		
		REF	RV15	RV30	REF	RV15	RV30
Resistência à compressão (MPa)	07	20,68 MPa	↓ 10 %	↓ 15 %	5,13	7,19	3,20
	28	24,98 MPa	↓ 5 %	↓ 15 %	8,87	4,08	7,58
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	07	2,52 MPa	↓ 10 %	↓ 18 %	2,95	7,95	14,94*
	28	2,37 MPa	↓ 11 %	↓ 32 %	11,49*	9,52	29,38*
	148	3,24 MPa	↓ 9 %	↓ 25 %	8,36	8,02	8,65
Módulo de elasticidade dinâmico (GPa)	07	49,02 GPa	↓ 10 %	↓ 11 %	2,63	3,72	5,17
	28	49,64 GPa	↓ 16 %	↓ 22 %	4,90	4,37	4,50
Absorção de água por imersão (%)	28	6,16 %	↑ 1 %	↑ 3 %	1,46	1,47	0,42
Absorção de água por capilaridade (g/cm ²)	28	0,69 g/cm ²	↓ 3 %	↓ 7 %	28,76*	12,89*	6,53
Expansibilidade de barras de argamassa (%)	30	0,15 %	0,38 %	0,77 %	0,38	0,15	0,00

↓↑ Porcentagem de aumento (↑) ou redução (↓) em relação ao valor de referência.

*Coeficientes de variação com maior dispersão.

Fonte: Autora (2019)

O coeficiente de variação é uma análise estatística preliminar, empregado quando se deseja comparar a variabilidade de várias amostras com o seu valor médio. Analisando a Tabela 38, verifica-se, com exceção de apenas 5 valores, que a maioria das amostras possuem um coeficiente de variação inferior a 10%, portanto os resultados obtidos fornecem uma ideia de boa homogeneidade dos dados. No entanto é indicado que sejam repetidos os ensaios que tiveram valores do COV elevado, para garantir a confiabilidade da pesquisa.

Observando os percentuais de aumento/diminuição entre as famílias, constatou-se que os concretos com substituição do agregado miúdo areia pelo resíduo de vidro são menos trabalháveis e possuem diferença pouco significativa quanto a massa específica. Também foi constatado, nos concretos com resíduo de vidro, uma resistência menor quanto as propriedades mecânicas. Em relação a durabilidade, não apresentaram médias com diferenças significativas nos ensaios de absorção de água, porém, evidenciou-se um valor bastante considerável quanto a potencialidade reativa dos agregados de resíduo de vidro para a reação álcali-agregado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento de materiais reciclados na construção civil e com perspectivas de contribuir para a sustentabilidade ambiental, esta pesquisa avaliou o comportamento de concretos produzidos com proporções de 15% e 30% de substituição do agregado miúdo areia pelo resíduo de vidro comum, assim como também avaliou algumas características físicas desse agregado reciclado.

A influência do resíduo de vidro no comportamento do concreto foi avaliada de forma comparativa com concreto de referência sem resíduos. Foram analisadas as propriedades físicas do concreto (consistência e massa específica), as propriedades mecânicas (resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico) e as propriedades de durabilidade (absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e expansão da reação álcali-agregado).

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

5.1 CONCLUSÕES

A partir dos resultados alcançados nesta pesquisa foi possível obter as principais conclusões:

- Com relação às características dos agregados de vidro, estes apresentaram valores de massa específica e massa unitária menores do que o agregado miúdo natural. Quanto a granulometria, o resíduo de vidro apresentou semelhança com a areia, porém a quantidade de partículas finas foi 11% maior que a da areia, além de possuir partículas com geometria mais angulares e lamelares. Essas características contribuíram para a diminuição pouco significativa do abatimento, massa específica e resistência mecânica e, um aumento considerável da expansão da RAA dos concretos com vidro. De forma geral, o resíduo de vidro não apresentou características muito distantes da areia, tornando-se possível a sua utilização como agregado miúdo na produção de concretos.
- O índice de consistência das misturas de concreto diminuiu em 3% e 46% em comparação com o concreto de referência, para as substituições de 15% e 30%, respectivamente. Constatou-se que não houve grandes interferências para a família RV15, no entanto a família RV30 teve sua trabalhabilidade comprometida. Atribuiu-se

a diminuição do abatimento à geometria angular e à quantidade de finos encontrados no material de vidro.

- Em relação à massa específica, os concretos produzidos com 15% e 30% de substituição do agregado de areia apresentaram reduções pouco significativas em relação ao concreto de referência, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido.
- Em relação à resistência à compressão, aos 28 dias, os concretos com 15% e 30% de substituição do agregado miúdo natural apresentaram reduções de 5% e 15%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Entretanto, estatisticamente as famílias REF e RV15 não apresentaram diferenças significativas.
- Em relação à resistência à tração por compressão diametral, aos 148 dias, os concretos com 15% e 30% de substituição do agregado miúdo natural apresentaram reduções de 9% e 27%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Acredita-se que os resultados aos 28 dias de idade tenham sofrido alguma alteração devido a possibilidade de variabilidade do método de ensaio, fazendo com que o mesmo saísse da linha de tendência.
- Em relação ao módulo de elasticidade dinâmico, aos 28 dias, os concretos com 15% e 30% de substituição do agregado miúdo natural apresentaram reduções de 16% e 22%, respectivamente, em relação ao concreto de referência. Os parâmetros estatísticos confirmaram um declínio das médias dos módulos de elasticidade das famílias RV15 e RV30 com o avanço da idade.
- Ficou constatado que os módulos de elasticidade nos concretos produzidos com resíduo de vidro, tenderam a diminuir com o avanço da idade e aumento da resistência à compressão. Demonstrando que, para esta pesquisa, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dos concretos não foram influenciados da mesma forma pelo tempo de cura.
- Quanto aos resultados de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, aos 28 dias, os concretos com 15% e 30% de substituição do agregado miúdo natural foram classificados como ótimos em relação a qualidade dos concretos.
- A diminuição da resistência mecânica foi atribuída à geometria angular e lamelar das partículas de vidro, visto que esses tipos de formato podem influenciar nas características da zona de transição na interface e, por tanto afetar a resistência do

concreto. Também foi considerado como causador da diminuição da resistência o fato da resistência do vidro em si ser menor que a resistência do agregado natural e a baixa rugosidade das partículas de vidro.

- Em relação à absorção de água, os concretos com agregados de vidro não apresentaram diferenças significativas dos resultados quando comparados ao concreto de referência, tanto por imersão quanto por capilaridade.
- Em relação à expansibilidade das barras de argamassa, aos 30 dias, os concretos com 15% e 30% de substituição do agregado miúdo natural ultrapassaram o limite referência de 0,19%, indicado pela NBR 15577-1 (2018) para inibição total da RAA. Sendo os valores médios de expansão atribuídos à família RV15 de 0,38%, classificado como potencialmente reativo grau R1 e a família RV30 com valor de 0,77%, classificado como potencialmente reativo grau R3, a areia foi classificada como inócua. Com base nesses dados é recomendado se seguir as diretrizes da NBR 15577-1 (2018) para a confirmação dos resultados e mitigação da expansão.
- Concluiu-se também que, a expansibilidade das famílias RV15 e RV30, com base na literatura, pode ter ocorrido devido ao tamanho das partículas de vidro. Visto que partículas em tamanhos menores o suficiente para desenvolver atividade pozolânica podem inibir a reação álcali-agregado.
- O concreto com 15% de resíduo de vidro em substituição parcial da areia apresentou melhores resultados que o percentual de 30% da família RV30.

A partir dos resultados e discussões obtidos neste trabalho, constatou-se que a substituição parcial da areia pelo resíduo de vidro comum, nos concretos preparados nas proporções de 15% e 30%, não produziu uma melhoria nas propriedades analisadas. Entretanto também não gerou perdas significantes nas propriedades mecânicas, atingindo resistências à compressão médias superiores a 20 MPa aos 28 dias de idade. Com relação às propriedades de durabilidade analisadas, além do bom resultado quanto à absorção de água, devem ser observados cuidados especiais quanto a expansão da RAA, diante do alto valor de potencialidade reativa constatado para as famílias RV15 e RV30. Em resumo, por se tratar de um agregado reciclado e não se enquadrar normativamente como um agregado para concreto estrutural, o RV utilizado nesta pesquisa pode ser aplicado como agregado miúdo no preparo de concretos sem função estrutural e para diversas finalidades, desde que suas características aqui apresentadas sejam previstas em projeto.

De forma geral, conclui-se que os resultados apontam para a viabilidade técnica da utilização do resíduo de vidro como agregado miúdo na produção de concretos não estruturais, apresentando dessa forma uma alternativa para a diminuição da extração dos recursos naturais, assim como também uma solução ambiental para o descarte e reutilização do RV no setor da construção civil. Qualquer outra forma de utilização em que o agregado de resíduo de vidro apresente características diferentes ao desta pesquisa, deve-se ser avaliado antes da sua aplicação.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desse trabalho estimulou a busca e também a necessidade de outras análises e que, devido às limitações do programa experimental e do tempo disponível, não puderam ser abrangidas. Sendo assim, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que ampliem o estudo da incorporação do resíduo de vidro em concretos.

- Realizar os mesmos ensaios com uma quantidade maior de corpos de prova para possibilitar uma melhor análise estatística dos resultados;
- Análise de outras propriedades relativas à durabilidade dos concretos com os resíduos de vidro, como penetração de íons cloreto, ataque por sulfatos e carbonatação;
- Análise da relação água/resíduo de vidro;
- Avaliar métodos de trituração do resíduo de vidro, visando, por meio de mecanismos de moagem, alcançar partículas menos angulares e lamelares;
- Realizar ensaios de fluorescência de raios X e de difração de raios X;
- Realizar análise microestrutural de concretos com resíduos de vidro;
- Realizar o ensaio dos prismas de concreto para confirmar a expansão da RAA;
- Avaliar o uso de inibidores adequados para a mitigação da reação álcali-agregado;
- Estudo do potencial pozolânico do RV como uma adição na preparação de concretos;
- Estudo do uso de resíduos de vidro quanto aos aspectos econômicos e sociais que envolvem o desenvolvimento sustentável, além do aspecto ambiental.
- Realizar estudos de campo com a finalidade de avaliar o comportamento do concreto com resíduos de vidro quando exposto às intempéries.

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO - **Associação Técnica Brasileira das Indústrias de Vidro**. Disponível em: <https://abividro.org.br/sustentabilidade/qualidade-do-vidro/>. Acesso em 25 de out. de 2019.

ABRAVIDRO - **Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidro Plano**. Disponível em: <http://www.andiv.com.br/>. Acesso em 25 de out. de 2019.

ADAWAY, M., & WANG, Y. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete - Effects on compressive strength. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v.14, nº 1, p.116–122, jan. 2015. ISBN 1443-9255.

ANUSHA, Mannava; REDDY, T. Ram Prasanna. Replacement of Fine Aggregate with Glass Powder in High Performance Concrete. **International Journal Of Advanced Technology And Innovative Research**, v. 15, n. 8, p. 2967-2973, out. 2016. ISSN 2348–2370.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 5738**: Concreto Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecido- Determinação da absorção de água, índice de vazios, e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9833**: Concreto fresco - Determinação da massa específica e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 11579**: Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 11582:** Cimento Portland - Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland: controle, preparo e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15577-1:** Agregados- Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-4:** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-5:** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-6:** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-7:** Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15900:** Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16372:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16606:** Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16607:** Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 14:** Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para determinação de dióxido de silício, óxido férrico, óxido de alumínio, óxido de cálcio e óxido de magnésio. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 15:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de resíduo insolúvel. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 16:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR NM 18:** Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, 2012.

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

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

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

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

_____. **NBR NM 67:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

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

ASTM C 1260. Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method), 2005.

ASTM C 597. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, 2016.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. **Materiais de construção:** concreto, madeira, cerâmica, metais, plásticos, asfalto. Novos Materiais para Construção Civil. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 488p.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado.** São Paulo: Editora PINI, 1998. 522 p.

CBCS (Org.). **Aspectos da Construção Sustentável no Brasil e Promoção de Políticas Públicas:** Subsídios para a promoção da Construção Civil Sustentável. PNUMA, 2014. 111 p.

CEMPRE – **Compromisso Empresarial para a Reciclagem.** Disponível em: <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>. Acesso em 25 de out. de 2019.

COSTA E SILVA, Ângelo J. C. et al. Concreto produzido com parte de resíduo de vidro na ilha de Fernando de Noronha-PE. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 53, nov. 2011, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Ibracon, 2011. p.1-12. ISSN 2175-8182.

FEDERICO, L. M.. **Waste Glass - A Supplementary Cementitious Material.** p.88. Tese (Doutorado) - Curso de Engineering, Department Of Civil Engineering, McMaster University, Ontario, 2013.

GAUTAM, S.P.; SRIVASTAVA, Vikas; AGARWAL, V.C.. Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete. **Journal Of Academia And Industrial Research**, v. 1, n. 6, p.320-322, nov. 2012. ISSN 2278-5213.

GÓMEZ-ZAMORANO, L. Y.; GARCÍA-GUILLÉN, G.; ACEVEDO-DÁVILA, J. L.. Study on the hydration of Portland cement paste replaced with blast furnace slag, fly ash, and metakaolin: effect on the usage of two superplasticizer additives.. **Revista Alconpat**, [s.l.], v. 5, n. 3, p.193-208, 30 set. 2015. Revista ALCONPAT. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i3.89>.

GUIGNONE, Guilherme Cunha. **Desempenho de Concretos com a Utilização de Resíduos da Lapidação do Vidro como Substitutos Parciais ao Cimento**. 2017. 286 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

IBRACON (São Paulo) (Org.). **Materiais de Construção Civil: e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: G.C. Isaia, 2007. 2v. 1712 p.

ISLAM, G.M. Sadiqul; RAHMAN, M.H.; KAZI, Nayem. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal Of Sustainable Built Environment**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.37-44, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2016.10.005>.

ISMAIL, Zainab Z.; AL-HASHMI, Enas A.. Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete. **Waste Management**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.655-659, fev. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.08.012>.

JUJ, Rabnawaz et al. Reuse of glass in concrete analysis with minimizing impact of solid waste on environment. **Moj Civil Engineering**, [s.l.], v. 4, n. 3, p.131-134, 2018. MedCrave Group, LLC. <http://dx.doi.org/10.15406/mojce.2018.04.00109>.

KE, Guojun et al. Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali-Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite. **International Journal Of Concrete Structures And Materials**, [s.l.], v. 12, n. 1, p.12-67, 20 nov. 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1186/s40069-018-0299-7>.

LING, Tung-chai; POON, Chi-sun; WONG, Hau-wing. Management and recycling of waste glass in concrete products: Current situations in Hong Kong. **Resources, Conservation And Recycling**, [s.l.], v. 70, p.25-31, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.10.006>.

LUZ, Adão Benvindo; ALMEIDA, Salvador Luiz M.. **Manual de agregados para construção civil**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432 p.

MAGESWARI, M.; VIDIVELLI, Dr. B.. The Use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete. **The Open Civil Engineering Journal**, [s.l.], v. 4, n. 1, p.65-71, 9 ago. 2010. Bentham Science Publishers Ltd.. <http://dx.doi.org/10.2174/18741495010040100065>.

MALIK, M. Iqbal. Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates. **Iosr Journal Of Engineering**, [s.l.], v. 3, n. 7, p.08-13, jul. 2013. IOSR Journals. <http://dx.doi.org/10.9790/3021-03760813>.

MATEUS, Ricardo Filipe Mesquita da Silva. **Avaliação da Sustentabilidade da Construção: Propostas para o Desenvolvimento de Edifícios mais Sustentáveis**. 2009. 427 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil / Processos de Construção, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, 2009.

MATOS, Ana Mafalda et al. Durability Enhancement Of SCC With Waste Glass Powder. **Materials Research**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.67-74, 19 fev. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2015-0288>.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3 ed. São Paulo, Editora IBRACON, 2008.

MIRANDA JR, Edson Jansen Pedrosa de. **Propriedades Físico-Mecânicas do Concreto de Cimento Portland Contendo Resíduo Vítreo como Agregado Miúdo**. 2012. 233 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Pro-reitoria de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Luís, 2012.

NASCIMENTO, Elimar Pinheiro do. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos Avançados**, [s.l.], v. 26, n. 74, p.51-64, 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-40142012000100005>.

NASSAR, Roz-ud-din; SOROUSHIAN, Parviz. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction And Building Materials**, [s.l.], v. 29, p.368-377, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 448p.

OLIVEIRA, Talita Gantus de Oliveira; PEREIRA, Eleonardo Lucas Pereira; MENDES, Guilherme da Cruz Mendes. Avaliação do uso de fibras de garrafas PET como reforço de solos compactados. **Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, [s.l.], 2016. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS. <http://dx.doi.org/10.20906/cps/cb-05-0037>.

OLOFINNADE, Oluwarotimi M. et al. Strength and microstructure of eco-concrete produced using waste glass as partial and complete replacement for sand. **Cogent Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.1-19, 18 jun. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2018.1483860>.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Agenda 2030**. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acessado em: 20 jul. 2019.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção**. 11. Ed. São Paulo: Globo, 1998. 435p.

PINHO, T. F. V de et al.. Estudo da Reciclagem de Cinza Volante e Biomassa para Obtenção de Agregado Sintético por Meio de Sinterização. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, [s.l.], p.1-10, jul. 2017. Editora Blucher. <http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeqic2017-357>.

QUEIROZ, Inácio Santiago de Oliveira et al. Avaliação do Efeito da Adição de Subproduto de uma Indústria Siderúrgica ao Concreto. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**, [s.l.], v. 3, n. 8, p.1059-1072, 14 set. 2017. Universidade Federal de Vicosa. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl3iss8pp1059-1072>.

RABELLO, Anna Carolina Lopes; VICENTE, Renan Tavares; SOUZA, Victor Barbosa. Utilização de Resíduo da Construção Civil em Concreto Estrutural. **Reinpec**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.209-221, 5 maio 2015. Faculdade Redentor. <http://dx.doi.org/10.20951/2446-6778/v1n1a15>.

RAMASUBRAMANI, R; DIVYA, S; VIJAY. Replacement of Sand by Sheet Glass Powder in Concrete. **International Journal Of Civil Engineering And Concrete Structures**, v. 1, n. 1, p.1-12, mar. 2016.

ROCHA, Bárbara Florrance de M; FIGUEIREDO, Filipe Bittencourt; ALTRAN, Daniele Araujo. Estudo das Propriedades Físicas, Mecânicas e Aplicação do Concreto Leve com a Utilização de Agregados de Poliestireno Expandido - EPS. **Colloquium Exactarum**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.36-43, 20 set. 2016. Associação Prudentina de Educação e Cultura (APEC). <http://dx.doi.org/10.5747/ce.2016.v08.n3.e164>.

SAAD, Davi Pedro et al. UTILIZAÇÃO DE FIBRA DE BORRACHA DE PNEU COMO AGREGADO NA COMPOSIÇÃO DE CONCRETO. **Revista Gestão, Inovação e Negócios**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.107-129, 21 jun. 2017. Revista Gestao, Inovacao e Negocios. <http://dx.doi.org/10.29246/2358-9868.2017v3i1.p107-129>.

SALVADORI, Mario. **Por que os edifícios ficam de pé**. 2. ed. São Paulo: WMF Martins Fontes, 2011.

SANCHEZ, Leandro Francisco Moretti. **Contribuição ao Estudo dos Métodos de Ensaio na Avaliação das Reações Álcali-Agregado em Concretos**. 2008. 170 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SILVA, José Glêdson de Sousa. **Produção de Concreto Cimentício com Agregado de Resíduos de Vidro Plano Temperado**. 2015. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SIMÕES, Lorena Jordoni. **Estudo da Aplicação de Resíduo de Vidro Laminado na Produção de Concreto**. 2013. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SINGH, Shivacharan; SRIVASTAVA, Vikas; AGARWAL, V.C.. Glass Waste in Concrete: Effect on Workability and Compressive Strength. **International Journal Of Innovative Research In Science, Engineering And Technology**, [s.l.], v. 4, n. 9, p.8142-8150, 15 set. 2015. Ess & Ess Research Publications. <http://dx.doi.org/10.15680/ijirset.2015.0409018>.

SHAIKH, Sameer; BACHHAV, S.S.; KSHIRSAGAR, D.Y.. Effective Utilisation of Waste Glass in Concrete. **Int. Journal Of Engineering Research And Applications**, v. 12, n. 5, p.01-04, dez. 2015. ISSN 2248-9622.

SHAO, Yixin et al. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 30, n. 1, p.91-100, jan. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(99\)00213-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(99)00213-6).

SHARIFI, Yasser et al. Utilization of Waste Glass Micro-particles in Producing Self-Consolidating Concrete Mixtures. **International Journal Of Concrete Structures And Materials**, [s.l.], v. 10, n. 3, p.337-353, 25 maio 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s40069-016-0141-z>.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement And Concrete Research**, [s.l.], v. 36, n. 3, p.457-468, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>.

TAHA, Bashar; NOUNU, Ghassan. Using lithium nitrate and pozzolanic glass powder in concrete as ASR suppressors. **Cement And Concrete Composites**, [s.l.], v. 30, n. 6, p.497-505, jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.010>.

UNEP (Org.). **Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future we Want.**: International Resource Panel, 2019. 162 p. ISBN: 978-92-807-3741-7.

WCED – World Commission on Environment and Development. Brundtland Report. **Our Common Future**. Oxford: Oxford University Press. United Kingdom. 1987.

ZIDOL, Ablam; TOGNONVI, Monique Tohoue; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Effect of Glass Powder on Concrete Sustainability. **New Journal Of Glass And Ceramics**, [s.l.], v. 07, n. 02, p.34-47, 2017. Scientific Research Publishing, Inc.,. <http://dx.doi.org/10.4236/njgc.2017.72004>.

APÊNDICE A

**Detalhamento e análise estatística dos resultados das
propriedades mecânicas do concreto**

Tabela 39 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Valores individuais ¹ de resistência à compressão aos 7 dias (MPa)		19,02	16,71	16,95
		19,23	17,53	17,02
		20,33	18,15	17,08
		20,88	18,50	17,36
		21,08	18,71	17,50
		21,53	19,15	17,83
		21,58	20,16	17,84
		21,67	20,83	18,64
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (MPa)	20,68	18,71	17,52
	Desvio padrão (MPa)	1,06	1,34	0,56
	Coef. de variação (%)	5,14	7,19	3,20
	Erro padrão (MPa)	0,37	0,48	0,20
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	Limite inferior	19,93	17,77	17,11
	Limite superior	21,40	19,63	17,89

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 40 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 7 dias

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF (0%)	8	165,33	20,68	1,10		
RV 15 (15%)	8	149,75	18,71	1,79		
RV 30 (30%)	8	140,23	17,52	0,32		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	40,13479	2	20,06739	18,72965	2,14E-05	3,4668
Dentro das famílias	22,4999	21	1,071424			
Total	62,63469	23				
Conclusão	Há variação significativa entre as famílias.					

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 41 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 7 dias de idade com o DMS.

DMS (diferença mínima significativa) = 1,302824				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	20,68	18,71	1,97	SIM
REF x RV 30	20,68	17,52	3,16	SIM
RV 15 x RV 30	18,71	17,52	1,19	NÃO

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

Tabela 42 - Detalhamento dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Valores individuais ¹ de resistência à compressão aos 28 dias (MPa)		21,64	22,34	19,20
		22,41	23,08	20,24
		24,13	23,32	20,40
		24,85	23,53	20,74
		25,46	23,54	21,83
		26,24	24,02	23,07
		27,57	25,02	23,21
		27,59	25,18	23,49
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (MPa)	24,98	23,74	21,50
	Desvio padrão (MPa)	2,22	0,97	1,63
	Coef. de variação (%)	8,87	4,08	7,58
	Erro padrão (MPa)	0,78	0,34	0,58
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	Limite inferior	23,44	23,07	20,37
	Limite superior	26,51	24,41	22,63

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 43 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão aos 28 dias

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF (0%)	8	199,89	24,98	4,83
RV 15 (15%)	8	190,04	23,74	0,92
RV 30 (30%)	8	172,17	21,50	2,59

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	49,3629	2	24,68145	8,871807	0,001611	3,4668
Dentro das famílias	58,4222	21	2,78201			
Total	107,7851	23				

Conclusão	
Há variação significativa entre as famílias.	

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 44 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à compressão entre as famílias aos 28 dias de idade com o DMS.

DMS (diferença mínima significativa) = 2,099347				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	24,98	23,74	1,24	NÃO
REF x RV 30	24,98	21,50	3,48	SIM
RV 15 x RV 30	23,74	21,50	2,24	SIM

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

Tabela 45 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
		2,45	2,09	1,75
Valores individuais ¹ de resistência à tração por compressão diametral aos 7 dias (MPa)		2,48	2,17	1,89
		2,53	2,40	2,19
		2,62	2,47	2,44
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (MPa)	2,52	2,28	2,07
	Desvio padrão (MPa)	0,07	0,18	0,31
	Coef. de variação (%)	2,95	7,95	14,94
	Erro padrão (MPa)	0,04	0,09	0,15
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	Limite inferior	2,45	2,10	1,76
	Limite superior	2,59	2,46	2,37

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 46 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração aos 7 dias

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF (0%)	4	10,08	2,52	0,00		
RV 15 (15%)	4	9,13	2,28	0,03		
RV 30 (30%)	4	8,27	2,07	0,09		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	0,40985	2	0,204925	4,595303	0,042148	4,256495
Dentro das famílias	0,40135	9	0,044594			
Total	0,8112	11				
Conclusão	Há variação significativa entre as famílias.					

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 47 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à tração entre as famílias aos 7 dias de idade com o DMS

DMS (diferença mínima significativa) = 0,417069				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	2,52	2,28	0,24	NÃO
REF x RV 30	2,52	2,07	0,45	SIM
RV 15 x RV 30	2,28	2,07	0,21	NÃO

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

Tabela 48 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
		2,07	1,87	1,22
Valores individuais ¹ de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa)		2,22	2,01	1,24
		2,51	2,24	1,73
		2,67	2,30	2,21
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (MPa)	2,37	2,11	1,60
	Desvio padrão (MPa)	0,27	0,20	0,47
	Coef. de variação (%)	11,49	9,52	29,38
	Erro padrão (MPa)	0,14	0,10	0,24
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	Limite inferior	2,10	1,91	1,14
	Limite superior	2,63	2,30	2,06

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 49 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração aos 28 dias

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF (0%)	4	9,47	2,37	0,07
RV 15 (15%)	4	8,42	2,11	0,04
RV 30 (30%)	4	6,40	1,60	0,22

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	1,217317	2	0,608658	5,447555	0,028166	4,256495
Dentro das famílias	1,005575	9	0,111731			
Total	2,222892	11				

Conclusão Há variação significativa entre as famílias.

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 50 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à tração entre as famílias aos 28 dias de idade com o DMS

DMS (diferença mínima significativa) = 0,660166				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	2,37	2,11	0,26	NÃO
REF x RV 30	2,37	1,6	0,77	SIM
RV 15 x RV 30	2,11	1,6	0,51	NÃO

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

Tabela 51 - Detalhamento dos resultados de resistência à tração por compressão diametral aos 148 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
		2,92	2,69	2,24
Valores individuais ¹ de resistência à tração por compressão diametral aos 148 dias (MPa)		3,11	2,84	2,35
		3,44	3,10	2,45
		3,49	3,21	2,73
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (MPa)	3,24	2,96	2,44
	Desvio padrão (MPa)	0,27	0,24	0,21
	Coef. de variação (%)	8,36	8,02	8,65
	Erro padrão (MPa)	0,14	0,12	0,11
Intervalo de confiança de 95% (MPa)	Limite inferior	2,98	2,73	2,24
	Limite superior	3,51	3,19	2,65

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 52 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de resistência à tração aos 148 dias

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF (0%)	4	12,96	3,24	0,07
RV 15 (15%)	4	11,84	2,96	0,05
RV 30 (30%)	4	9,77	2,44	0,04

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	1,311371	2	0,655685	11,2822	0,003529	4,256495
Dentro das famílias	0,523051	9	0,058117			
Total	1,834422	11				

Conclusão Há variação significativa entre as famílias.

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 53 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de resistência à tração entre as famílias aos 148 dias de idade com o DMS

DMS (diferença mínima significativa) = 0,476122				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	3,24	2,96	0,28	NÃO
REF x RV 30	3,24	2,44	0,80	SIM
RV 15 x RV 30	2,96	2,44	0,52	SIM

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

Tabela 54 - Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 7 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
		47,42	41,06	40,93
		47,64	42,92	41,48
		48,33	43,12	41,85
Valores individuais ¹ de módulo de elasticidade dinâmico aos 7 dias (GPa)		48,79	43,51	43,18
		49,50	44,30	43,38
		49,50	44,30	43,57
		49,50	45,97	44,58
		51,46	45,97	48,04
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (GPa)	49,02	43,89	43,38
	Desvio padrão (GPa)	1,29	1,63	2,24
	Coef. de variação (%)	2,63	3,72	5,17
	Erro padrão (GPa)	0,46	0,58	0,79
Intervalo de confiança de 95% (GPa)	Limite inferior	48,12	42,76	41,82
	Limite superior	49,91	45,03	44,93

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 55 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade aos 7 dias

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF (0%)	8	392,14	49,02	1,66
RV 15 (15%)	8	351,15	43,89	2,67
RV 30 (30%)	8	347,01	43,38	5,03

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	155,5849	2	77,79243	24,94142	2,84E-06	3,4668
Dentro das famílias	65,49913	21	3,119006			
Total	221,084	23				

Conclusão Há variação significativa entre as famílias.

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 56 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de módulo de elasticidade aos 7 dias de idade com o DMS

DMS (diferença mínima significativa) = 2,222865				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	49,02	43,89	5,13	SIM
REF x RV 30	49,02	43,38	5,64	SIM
RV 15 x RV 30	43,89	43,38	0,51	NÃO

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

Tabela 57 - Detalhamento dos resultados de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
		46,97	38,15	36,78
		47,20	40,34	37,40
		47,64	41,42	37,56
Valores individuais ¹ de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias (GPa)		48,10	41,42	37,56
		50,22	41,42	37,72
		51,97	42,73	38,20
		52,49	43,31	40,58
		52,49	43,90	41,66
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (GPa)	49,64	41,59	38,43
	Desvio padrão (GPa)	2,43	1,82	1,73
	Coef. de variação (%)	4,90	4,37	4,50
	Erro padrão (GPa)	0,86	0,64	0,61
Intervalo de confiança de 95% (GPa)	Limite inferior	47,95	40,33	37,23
	Limite superior	51,32	42,84	39,63

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 58 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias

RESUMO				
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
REF (0%)	8	397,08	49,64	5,92
RV 15 (15%)	8	332,69	41,59	3,29
RV 30 (30%)	8	307,46	38,43	2,98

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	533,9321	2	266,966	65,60856	9,28E-10	3,4668
Dentro das famílias	85,45054	21	4,069073			
Total	619,3826	23				

Conclusão Há variação significativa entre as famílias.

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 59 - Teste de Tukey referente à comparação dos resultados de módulo de elasticidade aos 28 dias de idade com o DMS

DMS (diferença mínima significativa) = 2,538942				
Comparação	Média 1	Média 2	Diferença entre Médias	Significância
REF x RV 15	49,64	41,59	8,05	SIM
REF x RV 30	49,64	38,43	11,21	SIM
RV 15 x RV 30	41,59	38,43	3,16	SIM

DMS (diferença mínima significativa)

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE B

**Detalhamento e análise estatística dos resultados
de absorção de água por imersão e por capilaridade**

Tabela 60 - Detalhamento dos resultados de absorção de água por imersão

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Valores individuais ¹ de absorção de água por imersão (%)		6,10	6,12	6,32
		6,11	6,23	6,33
		6,26	6,30	6,37
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (%)	6,16	6,22	6,34
	Desvio padrão (%)	0,09	0,09	0,03
	Coef. de variação (%)	1,46	1,47	0,42
	Erro padrão (%)	0,05	0,05	0,02
Intervalo de confiança de 95% (%)	Limite inferior	6,06	6,11	6,31
	Limite superior	6,26	6,32	6,27

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 61 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de absorção de água por imersão

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF (0%)	3	18,47	6,16	0,008		
RV 15 (15%)	3	18,65	6,22	0,008		
RV 30 (30%)	3	19,02	6,34	0,000		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	0,052422	2	0,026211	4,634578	0,060675	5,143253
Dentro das famílias	0,033933	6	0,005656			
Total	0,086356	8				

Conclusão Não há variação significativa entre as famílias.

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

Tabela 62 - Detalhamento dos resultados de absorção de água por capilaridade

FAMÍLIAS		REF (0%)	RV 15 (15%)	RV 30 (30%)
Valores individuais ¹ de absorção de água por capilaridade (%)		0,46	0,61	0,62
		0,79	0,64	0,62
		0,82	0,77	0,69
Análise estatística considerando todos os dados das amostras	Média (g/cm ²)	0,69	0,67	0,64
	Desvio padrão (g/cm ²)	0,20	0,09	0,04
	Coef. de variação (%)	28,76	12,89	6,53
	Erro padrão (g/cm ²)	0,11	0,05	0,02
Intervalo de confiança de 95% (g/cm ²)	Limite inferior	0,47	0,57	0,59
	Limite superior	0,92	0,77	0,69

¹ Valores em ordem crescente

Fonte: Autora (2019)

Tabela 63 - Resumo e Análise de Variância (ANOVA) dos resultados de absorção de água por capilaridade

RESUMO						
Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância		
REF (0%)	3	2,07	0,69	0,04		
RV 15 (15%)	3	2,02	0,67	0,00		
RV 30 (30%)	3	1,93	0,64	0,00		
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre as famílias	0,003356	2	0,001678	0,103213	0,903502	5,143253
Dentro das famílias	0,097533	6	0,016256			
Total	0,100889	8				
Conclusão	Não há variação significativa entre as famílias.					

SQ: soma dos quadrados

gl: graus de liberdade

MQ: média dos quadrados

F: variação entre médias da amostra / variação dentro das amostras

Fonte: Autora (2019)

APÊNDICE C

**Detalhamento dos resultados
de expansibilidade de barras de argamassa**

Tabela 64 - Resultados do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado - família REF

MOLDAGEM							
DATA	HORA	FAMÍLIA	% DE RV				
10/07/2019	16:30	REF	0%				
LEITURAS							
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	252,3	252,5	252,4	Média das variações dimensionais
<i>Leitura Orientativa</i>	11/07/19	2,308	LEITURA (mm)	3,050	2,870	3,826	
<i>l₀</i>	12/07/19	2,308	LEITURA (mm)	3,223	3,044	4,000	
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,915	0,736	1,692	
			LEITURA (mm)	3,231	3,052	4,006	
5	15/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,923	0,744	1,698	0,00
			VARIAÇÃO (%)	0,003	0,003	0,002	
			LEITURA (mm)	3,251	3,072	4,026	
7	17/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,943	0,764	1,718	0,01
			VARIAÇÃO (%)	0,011	0,011	0,010	
			LEITURA (mm)	3,271	3,092	4,046	
9	19/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	0,963	0,784	1,738	0,02
			VARIAÇÃO (%)	0,019	0,019	0,018	
			LEITURA (mm)	3,323	3,144	4,098	
14	24/07/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,016	0,837	1,791	0,04
			VARIAÇÃO (%)	0,040	0,040	0,039	
			LEITURA (mm)	3,376	3,197	4,151	
16 DIAS	26/07/19	2,306	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,070	0,891	1,845	0,06
			VARIAÇÃO (%)	0,061	0,061	0,061	
			LEITURA (mm)	3,419	3,240	4,194	
19	29/07/19	2,305	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,114	0,935	1,889	0,08
			VARIAÇÃO (%)	0,079	0,079	0,078	
			LEITURA (mm)	3,461	3,282	4,236	
21	31/07/19	2,306	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,155	0,976	1,930	0,09
			VARIAÇÃO (%)	0,095	0,095	0,094	
			LEITURA (mm)	3,504	3,325	4,279	
23	02/08/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,197	1,018	1,972	0,11
			VARIAÇÃO (%)	0,112	0,112	0,111	
			LEITURA (mm)	3,536	3,357	4,312	
26	05/08/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,228	1,049	2,004	0,12
			VARIAÇÃO (%)	0,124	0,124	0,124	
			LEITURA (mm)	3,602	3,423	4,377	
30 DIAS	09/08/19	2,306	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,296	1,117	2,071	0,15
			VARIAÇÃO (%)	0,151	0,151	0,150	

Fonte: Autora (2019)

Tabela 65 - Resultados do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado - família RV15

MOLDAGEM							
DATA	HORA	FAMÍLIA	% DE RV				
10/07/2019	16:34	RV 15	15%				
LEITURAS							
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	252,2	252,5	252,2	Média das variações dimensionais
<i>Leitura Orientativa</i>	11/07/19	2,308	LEITURA (mm)	3,951	4,220	3,566	
<i>l₀</i>	12/07/19	2,308	LEITURA (mm)	4,126	4,392	3,741	
			LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,818	2,084	1,433	
			LEITURA (mm)	4,142	4,407	3,756	
5	15/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,834	2,099	1,448	0,01
			VARIAÇÃO (%)	0,006	0,006	0,006	
			LEITURA (mm)	4,181	4,446	3,795	
7	17/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,873	2,138	1,487	0,02
			VARIAÇÃO (%)	0,022	0,021	0,021	
			LEITURA (mm)	4,220	4,485	3,834	
9	19/07/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	1,913	2,178	1,527	0,04
			VARIAÇÃO (%)	0,038	0,037	0,037	
			LEITURA (mm)	4,403	4,668	4,017	
14	24/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,095	2,360	1,709	0,11
			VARIAÇÃO (%)	0,110	0,109	0,109	
			LEITURA (mm)	4,587	4,852	4,201	
16 DIAS	26/07/19	2,308	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,279	2,544	1,893	0,18
			VARIAÇÃO (%)	0,183	0,182	0,182	
			LEITURA (mm)	4,697	4,962	4,311	
19	29/07/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,390	2,655	2,004	0,23
			VARIAÇÃO (%)	0,227	0,226	0,226	
			LEITURA (mm)	4,807	5,073	4,421	
21	31/07/19	2,306	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,501	2,767	2,115	0,27
			VARIAÇÃO (%)	0,271	0,270	0,270	
			LEITURA (mm)	4,919	5,182	4,531	
23	02/08/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,612	2,875	2,224	0,31
			VARIAÇÃO (%)	0,315	0,313	0,314	
			LEITURA (mm)	4,978	5,241	4,590	
26	05/08/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,671	2,934	2,283	0,34
			VARIAÇÃO (%)	0,338	0,337	0,337	
			LEITURA (mm)	5,095	5,359	4,708	
30 DIAS	09/08/19	2,307	LEITURA CORRIGIDA (mm)	2,788	3,052	2,401	0,38
			VARIAÇÃO (%)	0,385	0,383	0,384	

Fonte: Autora (2019)

Tabela 66 - Resultados do ensaio de reatividade em barras de argamassa pelo método acelerado - família RV30

MOLDAGEM							
DATA	HORA	FAMÍLIA	% DE RV				
10/07/2019	16:39	RV 30	30%				
LEITURAS							
IDADE / LEITURA	DATA	ZERAMENTO (mm)	COMPRIMENTO EFETIVO DOS MOLDES (mm)	252,4	252,5	252,4	Média das variações dimensionais
<i>Leitura Orientativa</i>	11/07/19	2,308	LEITURA (mm)	3,521	3,968	3,280	
<i>l₀</i>	12/07/19	2,307	LEITURA	3,690	4,136	3,448	
			CORRIGIDA (mm)	1,383	1,829	1,141	
			LEITURA (mm)	3,718	4,165	3,476	
5	15/07/19	2,308	LEITURA	1,410	1,857	1,168	0,01
			CORRIGIDA (mm)	0,011	0,011	0,011	
			VARIAÇÃO (%)	0,011	0,011	0,011	
			LEITURA (mm)	3,836	4,283	3,595	
7	17/07/19	2,307	LEITURA	1,529	1,976	1,288	0,06
			CORRIGIDA (mm)	0,058	0,058	0,058	
			VARIAÇÃO (%)	0,058	0,058	0,058	
			LEITURA (mm)	3,955	4,402	3,713	
9	19/07/19	2,307	LEITURA	1,648	2,095	1,406	0,11
			CORRIGIDA (mm)	0,105	0,105	0,105	
			VARIAÇÃO (%)	0,105	0,105	0,105	
			LEITURA (mm)	4,439	4,886	4,197	
14	24/07/19	2,307	LEITURA	2,132	2,579	1,890	0,30
			CORRIGIDA (mm)	0,297	0,297	0,297	
			VARIAÇÃO (%)	0,297	0,297	0,297	
			LEITURA (mm)	4,923	5,370	4,681	
16 DIAS	26/07/19	2,307	LEITURA	2,616	3,063	2,374	0,49
			CORRIGIDA (mm)	0,489	0,489	0,489	
			VARIAÇÃO (%)	0,489	0,489	0,489	
			LEITURA (mm)	5,087	5,534	4,845	
19	29/07/19	2,306	LEITURA	2,781	3,228	2,539	0,55
			CORRIGIDA (mm)	0,554	0,554	0,554	
			VARIAÇÃO (%)	0,554	0,554	0,554	
			LEITURA (mm)	5,251	5,698	5,009	
21	31/07/19	2,305	LEITURA	2,946	3,393	2,704	0,62
			CORRIGIDA (mm)	0,619	0,619	0,619	
			VARIAÇÃO (%)	0,619	0,619	0,619	
			LEITURA (mm)	5,415	5,862	5,173	
23	02/08/19	2,304	LEITURA	3,111	3,558	2,869	0,68
			CORRIGIDA (mm)	0,685	0,685	0,685	
			VARIAÇÃO (%)	0,685	0,685	0,685	
			LEITURA (mm)	5,488	5,936	5,247	
26	05/08/19	2,304	LEITURA	3,184	3,632	2,943	0,71
			CORRIGIDA (mm)	0,714	0,714	0,714	
			VARIAÇÃO (%)	0,714	0,714	0,714	
			LEITURA (mm)	5,636	6,084	5,395	
30 DIAS	09/08/19	2,307	LEITURA	3,329	3,777	3,088	0,77
			CORRIGIDA (mm)	0,771	0,771	0,771	
			VARIAÇÃO (%)	0,771	0,771	0,771	

Fonte: Autora (2019)

ANEXO A

Boletim de ensaios de cimento

Boletim de Ensaios de Cimento



Atualizado em: **16/05/2019** Produto: **CPII-Z-32 Todas as Obras** Norma: **16697**
 Mês e ano de referência: **abr/19** Marca: **Poty** Unidade: **Poty Paulista**

Ensaios	Químicos				Físicos e mecânicos										
	Teores (%)				Finura(%)		Blaine (cm ² /g)	Água de consist. (%)	Tempo Pega		Expansib. a quente (mm)	Resist. à Compressão (MPa)			
	PF	MgO	SO3 para C ₃ A>8	RI	#200	#325			Início (min)	Fim (min)		1 Dia	3 Dias	7 Dias	28 Dias
Limites de Norma	≤ 8,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 18,0	≤ 12,0	N/A	≥ 2600	N/A	≥ 60	≤ 600	≤ 5,0	N/A	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0 ≤ 49,0

01/04/2019																
02/04/2019	7,21	2,03	2,67	14,23	0,3	3,9	5360	29,5	265	330	0,5		23,2	28,9	37,1	
03/04/2019																
04/04/2019	7,78	2,11	2,79	13,09	0,4	4,6	5400	29,5	240	300	0,5		21,4	28,5	35,7	
05/04/2019																
06/04/2019	7,05	2,41	2,93	11,73	0,3	3,6	5350	29,6	220	290	0,0		24,3	31,9	39,6	
07/04/2019																
08/04/2019																
09/04/2019	8,48	2,35	2,79	11,36	0,2	3,8	5200	28,8	235	300	0,0		24,8	30,3	39,0	
10/04/2019																
11/04/2019	8,41	2,11	2,84	10,37	0,2	3,7	5210	29,2	240	310	0,0		25,2	32,1	38,8	
12/04/2019																
13/04/2019	8,24	1,89	2,86	10,67	0,2	3,4	5230	28,8	240	300	0,5		22,7	29,0		
14/04/2019																
15/04/2019																
16/04/2019	8,48	1,94	2,57	10,77	0,3	3,8	5290	28,8	240	300	0,0		21,8	28,3		
17/04/2019																
18/04/2019	8,46	1,78	2,76	10,92	0,4	3,6	5430	29,1	245	310	0,5		24,6	30,1		
19/04/2019																
20/04/2019	8,35	1,93	2,78	11,40	0,4	3,6	5450	29,3	260	320	0,5		21,7	27,3		
21/04/2019																
22/04/2019																
23/04/2019	8,07	2,01	2,77	11,46	0,3	3,3	5590	29,4	255	320	0,0		21,2	27,4		
24/04/2019																
25/04/2019	8,01	1,94	2,90	10,30	0,4	3,7	5410	29,3	260	310	0,5		22,3	28,0		
26/04/2019																
27/04/2019	8,11	1,91	2,82	10,70	0,5	4,1	5400	29,0	260	320	0,0		22,7	28,3		
28/04/2019																
29/04/2019																
30/04/2019	7,96	1,81	2,64	11,90	0,4	3,1	5390	29,0	255	315	0,5		23,5	29,9		
Média	8,05	2,02	2,78	11,45	0,33	3,71	5362,31	29,18	247,31	309,62	0,27	#DIV/0!	23,03	29,23	38,04	
Desvio Padrão	0,46	0,19	0,10	1,12	0,09	0,37	108,95	0,28	13,01	11,27	0,26	#DIV/0!	1,36	1,55	1,60	
Mínimo	7,05	1,78	2,57	10,30	0,20	3,10	5200,00	28,80	220,00	290,00	0,00	0,00	21,20	27,30	35,70	
Máximo	8,48	2,41	2,93	14,23	0,50	4,60	5590,00	29,60	265,00	330,00	0,50	0,00	25,20	32,10	39,60	

Observações:

Denise B. B. Oliveira

Nome
Responsável Controle de Qualidade
Votorantim Cimentos S/A

Nome
Gerente da Fábrica
Votorantim Cimentos S/A

Central de Relacionamento com o Cliente: Capitais 4003 9894 | Demais localidades 0800 701 9894
 Serviço de Atendimento ao Consumidor: 0800 701 9898
 Site: www.vcimentos.com.br