

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO MOÍDO DE VIDRO INDUSTRIAL NA CONFECÇÃO DE
ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND EM PORTO VELHO/RO**

RADUAN KRAUSE LOPES

**MANAUS/AM
2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

RADUAN KRAUSE LOPES

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO MOÍDO DE VIDRO INDUSTRIAL NA CONFECCÃO DE
ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND EM PORTO VELHO/RO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Orientadora: Prof.^a Dr(a). Adalena Kennedy Vieira

**MANAUS/AM
2017**

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

L864u Lopes, Raduan Krause
 utilização de resíduo moído de vidro industrial na confecção de
 argamassa de cimento portland em porto velho/ro / Raduan Krause
 Lopes. 2017
 107 f.: il. color; 31 cm.

 Orientadora: Adalena Kennedy Vieira
 Coorientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos
 Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
 Federal do Amazonas.

 1. Resíduo de vidro. 2. Argamassa. 3. Atividade pozolânica. 4.
 Reação álcali agregado. I. Vieira, Adalena Kennedy II. Universidade
 Federal do Amazonas III. Título

ERRATA			
Folha	LINHA / ILUSTRAÇÃO	Onde se lê	Leia-se
14	Quadro 7	Resistência média a compressão e trabalhabilidade das argamassas	Resistência média a compressão e o espalhamento das argamassas
32	Linha 1	Sichieriet al.(2010)	Sichieri et al.(2010)
32	Linha 13	Sichieriet al.(2010)	Sichieri et al.(2010)
74	Figura 27	traço 2	Traço 2
82	Quadro 7	Resistência média a compressão e abatimento das argamassas	Resistência média a compressão e o espalhamento das argamassas

Referência da obra a ser incluída a errata

LOPES, R. K. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO MOÍDO DE VIDRO INDUSTRIAL NA CONFECÇÃO DE ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND EM PORTO VELHO/RO. 2017, 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2017.

RADUAN KRAUSE LOPES

**UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO MOÍDO DE VIDRO INDUSTRIAL NA CONFECÇÃO
DE ARGAMASSA DE CIMENTO PORTLAND EM PORTO VELHO/RO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

APROVADA EM: 28 de agosto de 2017.

Prof.^a Dr.^a Adalena Kennedy Vieira

Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. João de Almeida Melo Filho

Universidade Federal do Amazonas

Prof.^a Dr.^a Samantha Coelho Pinheiro

Universidade do Estado do Amazonas

DEDICATÓRIA

A Deus, primeiramente, pois ele é o criador de tudo e sem a força dele não teria alcançado o final desse trabalho, aos meus pais por me ter dado a dádiva da vida e também me trilhado no caminho até aqui, e em especial a minha esposa por todo o incentivo e companheirismo ao longo dessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma puderam me ajudar na trilha desse caminho científico, quer seja com a contribuição técnico – científica, quer pelo simples gesto de força e incentivo e até no trabalho pesado quando foi necessário.

A minha orientadora, professora Dra. Adalena Kennedy Vieira, por todo o incentivo, por todo o conhecimento repassado, também por todas as broncas e também pelos ouvidos nas horas de desabafo.

A faculdade de Rondônia – FARO, pela parceria formada com a Universidade Federal do Amazonas – UFAM, que pode trazer para nossa cidade um programa de mestrado na área da Engenharia Civil.

A minha esposa Jayne, por todo incentivo, força e amor que dedicou a mim no decorrer dessa caminhada, aos desabafos e choros ao decorrer dos percalços da pesquisa, mas também por compartilhar cada alegria por cada avanço e sucesso desse trabalho.

Aos meus pais, por todo o carinho demonstrado nesses anos, no incentivo aos estudos e as cobranças que foram necessárias ao longo dos anos para que pudesse chegar ao patamar de hoje, muito obrigado por tudo.

Aos amigos, os verdadeiros amigos, que também acompanharam essa caminhada, dando forças também nos poucos momentos que podemos desfrutar de lazer durante esse trabalho, afinal nossa vida social fica ínfima durante nossa pesquisa.

Ao professor Dr. Lizandro Manzato, que foi o primeiro professor a me incentivar no ingresso do mestrado, e por ter ajudado a montar o primeiro plano de pesquisa da minha vida. Sem aquele churrasco não seria mestre hoje, obrigado professor.

Ao professor Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, coorientador, por todas as contribuições técnicas e por ter apresentado o vidro como material de pesquisa, e também por toda atenção prestada, mesmo à distância, para minhas dúvidas e ligações.

Ao departamento de Engenharia Civil da Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, que me deu total apoio para o andamento da pesquisa, incentivando o aperfeiçoamento do grupo docente do departamento.

Aos amigos da UNIR, em especial prof. Dr. Santini, como chefe de departamento, pelos valiosos conselhos. Ao professor Dr. Petrus Luiz Pequeno, pela infinita contribuição

acadêmica, pelos tratamentos estatísticos do trabalho e também pelo ombro amigo nas horas necessárias. Ao professor Ms. Fabiano Medeiros, por toda revisão metodológica e todo a revisão realizada com todo empenho para o meu trabalho. Aos professores João Henrique, Livia Maria, Tatiane Checchia, João Renato, Marcelo Rambo, Bruno Mesquita por contribuírem de alguma forma a minha capacitação. Aos técnicos de laboratório, Arione Cavalcante, André Vinicius e em especial Pedro Jardim por ter além de ajudar em todos os ensaios e desenvolvimento das caracterizações tornou-se um amigo acima de tudo.

A empresa ROMAT Comercial de produtos químicos para construção pela doação da amostra do superplastificante utilizado nessa pesquisa.

A Guaporé indústria e comércio de vidro (BLINDEX), na pessoa da gerente comercial Eliane, por toda a presteza e atenção para coleta do resíduo de vidro.

Enfim a todos que puderam dar suas contribuições deixo aqui o meu muito obrigado.

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer.”

(Albert Einstein)

RESUMO

A destinação dos resíduos sólidos na construção civil tem gerado ao longo dos anos uma preocupação crescente, seja quanto ao seu aproveitamento, ou sua destinação. Entre estes materiais que necessitam de descarte, o vidro ocupa papel importante, já que é crescente o número de pesquisa que abordam a sua reutilização. Buscou-se, nesta dissertação, avaliar a introdução do resíduo moído de vidro (RMV) como substituição parcial do cimento em argamassas de cimento Portland, observando-se influência dos tempos de moagem e percentual de substituição nas argamassas de cimento Portland. A pesquisa desenvolveu-se a partir de uma adaptação da Norma NBR 15.577-4:2008, para a qual foram definidos os tempos de moagem de resíduo de vidro de 16, 32, 48 e 72 horas, bem como os percentuais de substituição parcial do cimento de 10%, 20%, 30% e 40%. Observando-se somente os tempos de moagem de 16 e 32 horas, objetivando-se avaliar os resultados da resistência à compressão, foram aplicadas substituições parciais de 10%, 15% e 20%. Outrossim, para os mesmos tempos de moagem, de acordo com a NBR 5752:1992, foram verificadas as propriedades pozolânicas dos resíduos de vidro. Em termos estatísticos não houveram grandes variações na resistência à compressão quando da alteração dos tempos de moagem para o mesmo percentual de substituição. Contudo, o percentual de 20% para os tempos de 16 e 32 horas apresentou os melhores resultados. Para estes tempos, respectivamente, os índices de atividade pozolânica registrados foram de 103,3% e 98,5%. A variação dos tempos de moagem não interferiu nos resultados das expansões. Já o percentual mínimo de substituição de 10% de resíduo de vidro mostrou-se favorável à redução da reação álcali agregado.

Palavras-Chave: resíduo de vidro; argamassa; atividade pozolânica; reação álcali agregado.

ABSTRACT

The disposal of solid waste in civil construction has generated over the years an increasing concern, either as to its use or its destination. Among these materials that need disposal, glass plays an important role, since the number of research is increasing Which address their reuse. The aim of this dissertation was to evaluate the introduction of ground glass waste (RMV) as a partial replacement of the cement in Portland cement mortars, observing the influence of grinding times and percentage of substitution on Portland cement mortars. The research was developed based on an adaptation of Standard NBR 15.577-4: 2008, which defined the grinding times of 16, 32, 48 and 72 hours of glass residue, as well as the percentages of partial replacement of the 10%, 20%, 30% and 40%. It was observed only the grinding times of 16 and 32 hours, aiming to evaluate the results of the compressive strength, partial substitutions of 10%, 15% and 20% were applied. Also, for the same milling times, according to NBR 5752: 1992, the pozzolanic properties of the glass residues were verified. In statistical terms, there were no great variations in the compressive strength when the milling times were changed to the same replacement percentage. However, the percentage of 20% for the times of 16 and 32 hours presented the best results. For these times, respectively, pozzolanic activity indexes were 103.3% and 98.5%. The variation of grinding times did not interfere with the results of the expansions. The minimum percentage of substitution of 10% of glass residue was favorable to the reduction of the aggregate alkali reaction.

Keywords: glass waste; mortar; Pozzolanic activity; Aggregate alkali reaction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percentual dos tipos de vidros produzidos pela indústria de vidros planos.	17
Figura 2 - Impurezas e concentrações na água de amassamento para matriz cimentícia	26
Figura 3 – Estrutura de sólido cristalino (a) e do vidro (b).	32
Figura 4 - Fissura padrão em concreto com agregado reativo	41
Figura 5 - Reação Álcali-agregado, fissuração do agregado e propagação da fissura para pasta cimentícia	42
Figura 6 - Lotes de vidro separado para corte (a,b) e sobras do processo (c, d).	48
Figura 7 - Processo de desbastamento do vidro	48
Figura 8 – Calha de recolhimento das máquinas de desbastamento (a), (b) e (c), processo de adição de floculante a água com resíduo de vidro (d), acondicionamento de resíduo de vidro em sacos plásticos de 60 kg (e) e depósito de resíduo em caçamba estacionária (f).	49
Figura 9 - (a) (b) (c) (d) Preparação do resíduo de vidro para secagem em estufa. .	50
Figura 10 - Moagem do resíduo de vidro no moinho de bolas.	51
Figura 11 - (a) disposição do resíduo de vidro no jarro e (b) operação de moagem .	51
Figura 12 – Analisador de partículas à laser LAMIN, CPRM Manaus.	52
Figura 13 – Espectômetro de raio X por energia dispersiva, modelo EPSILON 3XL	53
Figura 14 – Difrator de Raio X – do laboratório de Nanomateriais do IFAM	54
Figura 15 - (a) e (b) corpos de prova para realização de ensaio de atividade pozolânica, (c) corpos de prova selados com papel filme e (d) recipiente hermético com os corpos de prova colocados em estufa.	55
Figura 16 – Separação do materiais para ensaio de RAA (a) e (b), confecção dos traços (c) e (d).	57
Figura 17 – (a) confecção de 3 barras de argamassa, (b) barras em ambiente úmido, (c) barras em solução de hidróxido de sódio dentro da estufa ventilada e (d) equipamento de medição de expansão.....	58
Figura 18 - Equipamento termogravimétrico do laboratório de ensaios físico- químicos/FT/UFAM.	60
Figura 19 - (a) betoneira utilizada na confecção das argamassas, (b) execução da mistura das argamassas e (c) e (d) ensaio de espalhamento das argamassas.....	63

Figura 20 - (a) Moldagem dos corpos de prova e (b) cura submersa.....	63
Figura 21 - (a) Máquina Universal de ensaios mecânicos e (b) máquina policorte para retificação das superfícies dos corpos de prova	64
Figura 22 - Curva granulométrica do agregado miúdo	67
Figura 23 - (a) Tabela colorimétrica e (b) ensaio da areia utilizada na pesquisa.	68
Figura 24 – Curva granulometria do cimento CP II – Z - 32	69
Figura 25 – Difratoograma do cimento CII – Z - 32.....	70
Figura 26 – Curvas TG e DTG do cimento CII – Z-32.....	71
Figura 27 - Gráfico de expansão traços 1 a 4 – substituição de 10% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.....	72
Figura 28 - Gráfico de expansão traços 5 a 8 – substituição de 20% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.....	73
Figura 29 - Gráfico de expansão traços 9 a 12 – substituição de 30% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.....	74
Figura 30 - Gráfico de expansão traços 9 a 12 – substituição de 40% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.....	74
Figura 31 – Granulometria resíduo moído de vidro 16 e 32 horas e cimento CP II...	76
Figura 32 – Difração de raio X realizado no resíduo de vidro – moagens de 16 e 32 horas.	78
Figura 33 - Gráfico de resistência à compressão aos 3 dias.....	81
Figura 34 - Gráfico de resistência à compressão aos 7 dias.....	84
Figura 35 - Gráfico de resistência à compressão aos 21 dias.....	85
Figura 36 - Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias.....	87
Figura 37 - Gráfico comparativo de resistência entre 3 e 28 dias dos traços de argamassa.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composições de alguns vidros de silicatos.....	31
Tabela 2 – Composição química do cimento CP II – Z – 32.	45
Tabela 3 – Análises físicas do cimento CP II – Z - 32.....	45
Tabela 4 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa	47
Tabela 5 - Composição dos materiais para ensaio de reatividade álcali-agregado...56	
Tabela 6 – Traços com as quantidades de material em kg e fator a/c corrigido	62
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo	66
Tabela 8 – Composição química do Cimento CPlI – Z - 32	69
Tabela 9 – Composição química do resíduo de vidro	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas.....	20
Quadro 2 – Principais Óxidos do Cimento.....	23
Quadro 3 - Características do Superplastificante Glenium 51.....	46
Quadro 4 – Esquema de interação dos traços das barras de argamassa para análise de reação álcali agregado.	58
Quadro 5 – Nomenclaturas dos traços do trabalho e suas respectivas características.	61
Quadro 6 - Relação de autores que justificam a redução da expansão da reação álcali agregado com o aumento do resíduo moído de vidro.	76
Quadro 7 - Resistência média a compressão e trabalhabilidade das argamassas ...	80
Quadro 8 - Análise fatorial da resistência à compressão (3 dias).	81
Quadro 10 - Análise fatorial da resistência à compressão (7 dias).	82
Quadro 11 - Interações entre fatores de tempo de moagem do resíduo de vidro e % de substituição (7 dias).	83
Quadro 12 - Análise fatorial das interações entre tempo de moagens e substituição do resíduo moído de vidro na resistência a compressão (21 dias).	84
Quadro 13 - Interações entre fatores de tempo de moagem do resíduo de vidro e % de substituição (21 dias).	85
Quadro 14 - Análise fatorial das resistências à compressão (28 dias).....	86
Quadro 15 - Interações entre fatores de tempo de moagem do resíduo de vidro e % de substituição (28 dias).	86

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Objetivo Geral.....	18
1.2. Objetivos Específicos	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1. ARGAMASSA.....	19
2.1.1. Argamassas hidráulicas e suas propriedades.....	19
2.1.2. Trabalhabilidade e consistência	20
2.1.3. Segregação e exsudação.....	21
2.1.4. Constituintes das Argamassas	22
2.1.4.1. Cimento Portland	22
2.1.4.1.1. Produção e composição do cimento Portland	22
2.1.4.1.2. Hidratação do cimento	24
2.1.4.2. Água de amassamento	25
2.1.4.3. Agregado miúdo.....	26
2.1.4.4. Adições minerais – fíleres e pozolanas.....	27
2.1.4.5. Utilização de adições minerais em compósitos cimentícios.....	28
2.2. VIDRO	29
2.2.1. Estrutura química do vidro	30
2.2.2. Produção e utilização do vidro	32
2.2.3. Resíduo sólido de vidro.....	33
2.2.4. Vidro e sua utilização em matriz cimentícia	34
2.3. REAÇÃO ALCALI AGREGADO	39
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1. Materiais.....	45

3.2.	Métodos.....	46
3.2.1.	Métodos de ensaios de caracterização do agregado miúdo	46
3.2.2.	Métodos de coleta, preparo e caracterização do resíduo de vidro	47
3.2.2.1.	Coleta do resíduo industrial	47
3.2.2.2.	Preparo do resíduo de vidro para moagem.....	50
3.2.2.3.	Granulometria à laser – resíduo moído de vidro	52
3.2.2.4.	Composição química do resíduo moído de vidro	52
3.2.2.5.	Análise de difração de raio X – DRX – resíduo de vidro	53
3.2.2.6.	Ensaio de determinação de atividade pozolânica	54
3.2.2.7.	Ensaio de determinação de reação álcali agregado	56
3.2.3.	Caracterização do cimento Portland CP II-Z-32.....	59
3.2.3.1.	Granulometria à laser do cimento	59
3.2.3.2.	Termogravimetria do cimento	59
3.2.3.3.	Composição química do cimento	60
3.2.3.4.	Difração de raio X – DRX Cimento	61
3.2.4.	Produção e caracterização das argamassas	61
3.2.4.1.	Dosagem das argamassas	61
3.2.5.	Ensaio mecânico.....	64
3.2.6.	Análise estatística dos dados.....	64
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	66
4.1.	Resultados e análises dos ensaios de caracterização dos materiais.....	66
4.1.1.	Agregado miúdo.....	66
4.1.2.	Cimento Portland CII – Z	68
4.1.2.1.	Granulometria à laser	68
4.1.2.2.	Composição química, Termogravimetria e Difração de raio X	69
4.1.3.	Resíduo Moído de Vidro.....	72
4.1.3.1.	Reação Álcali Agregado.....	72

4.1.3.2.	Granulometria à laser	76
4.1.3.3.	Composição química e difração de raio X.....	77
4.1.3.4.	Atividade pozolânica	78
4.1.4.	Caracterização das Argamassas com Resíduo Moído de Vidro	79
4.1.4.1.	Resistência à Compressão	79
5.	CONCLUSÕES	90
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	92
	REFERÊNCIAS.....	93

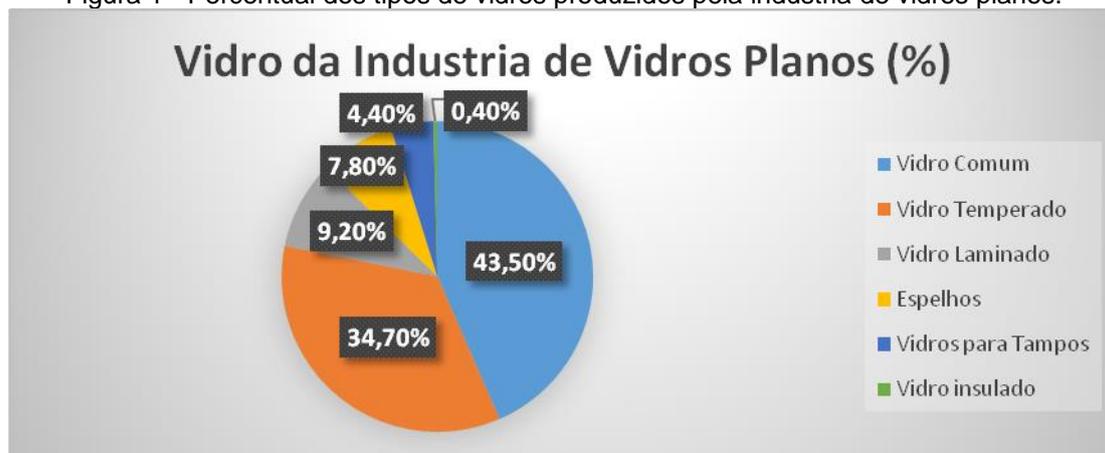
1. INTRODUÇÃO

O aumento dos resíduos sólidos tem se mostrado um problema mundial, e encontrar formas adequadas para descarte desse resíduo tem sido um grande desafio para os meios tecnológicos e científico, haja vista que a disposição incorreta desses materiais gera graves problemas ambientais (SOUSA NETO, 2014). Angulo (2005) descreve que a indústria da construção civil é o grande celeiro para a absorção de resíduo sólidos oriundos da construção civil.

Entre os resíduos sólidos gerados no Brasil, o vidro se destaca pelo volume elevado, onde o vidro representou 3% do volume dos resíduos sólidos gerados no Brasil no ano de 2017 (CEMPRE, 2017). Segundo a Abravidro (2017) o consumo anual de vidro no Brasil foi de 1.577.776 de toneladas, representando um faturamento de R\$ 4.121 milhões. Ainda no Brasil são produzidas cerca de 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, sendo desse número 45% utilizado para reciclagem, onde o principal mercado são as próprias empresas de vidro e empresas de coleta seletiva (CEMPRE, 2017).

No ano de 2017, a indústria de vidros planos apresentou uma capacidade de produção de vidro de 6.920 toneladas por dia, onde desse volume 43,5% é representado pelo vidro comum, 34,7% de vidro temperado, 9,2% de vidro laminado, 7,8% de espelho, 4,4% de vidros para tampos, e 0,4% de vidro insulado, conforme figura 1 (ABIVIDRO, 2017). Segundo Rosa (2007) estima-se que apenas 14% do volume de vidro seja destinado a reciclagem.

Figura 1 - Percentual dos tipos de vidros produzidos pela indústria de vidros planos.



Fonte: próprio autor

A utilização de vidro como material componente de produtos cimentícios, quer seja como agregado quer pela substituição parcial do cimento Portland, tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores, uma vez que a incorporação desse resíduo em compósitos cimentícios tem como vantagens a melhoria das propriedades da matriz cimentícia (SOUSA NETO, 2014). Dessa maneira, a utilização desse resíduo como material alternativo de compósitos cimentícios seria uma alternativa para destinar esse resíduo da indústria de beneficiamento de vidros planos na cidade de Porto Velho/RO.

Segundo Bauer (2015) o vidro é um material composto basicamente por sílica ou dióxido de silício (SiO_2) onde esse composto corresponde à 70% da sua composição química do vidro. Tendo esse vidro uma estrutura amorfa e rica em sílica, o mesmo é enquadrado como um material pozolânico onde sua incorporação a matriz cimentícia acarreta melhoras nas propriedades mecânicas e na durabilidade dos compósitos cimentícios (MEHTA E MONTEIRO, 2005; NEVILLE E BROOKS, 2013).

Assim, nesse trabalho foi avaliada a substituição parcial do cimento por resíduo moído de vidro (RMV) em argamassas de cimento Portland, onde foram avaliados a potencialidade do RMV como inibidor da reação álcali agregado, quanto a variação do tempo de moagem e percentual de substituição. Também foram analisados os mesmos fatores para a influência na resistência a compressão das argamassas.

1.1. Objetivo Geral

Avaliar a utilização de resíduo moído de vidro industrial como substituição parcial do cimento em argamassas de cimento Portland.

1.2. Objetivos Específicos

Analisar a potencialidade reativa da reação álcali agregado ao utilizar resíduo moído de vidro em substituição parcial do cimento para confecção de argamassas de cimento Portland;

Analisar a influência na resistência mecânica à compressão da argamassa de cimento Portland, quando modificado o percentual de substituição parcial do cimento por resíduo moído de vidro;

Analisar a influência na resistência mecânica à compressão da argamassa de cimento Portland, quando modificado o tempo de moagem desse RMV.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ARGAMASSA

A NBR 13281:2005 e Carasek (2010) descreve argamassas como material de construção com propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, água, agregado miúdo podendo conter ou não aditivos e adições minerais. São empregados em assentamento de alvenarias e nas etapas de revestimento, como emboço, reboco ou revestimentos de camada única de paredes e tetos, além de assentamento e rejuntamento de revestimentos de cerâmica e pedra.

A função da argamassa está intrinsecamente ligada à sua aplicação: as argamassas de assentamento promovem a união entre blocos/tijolos, realizam a distribuição uniforme das cargas além de minimizar os impactos gerados por eventuais deformações. Já as argamassas decorativas de fachada, além da sua função estética, são responsáveis pela proteção da estrutura da fachada contra a entrada de umidade. As argamassas de revestimento, por fim, têm como função principal a proteção contra as intempéries e melhoria das condições termo acústicas da edificação (PAIXÃO, 2011).

2.1.1 Argamassas hidráulicas e suas propriedades

A argamassa hidráulica é definida como uma mistura envolvendo um ou mais materiais aglomerantes, geralmente o cimento, e agregado fino, sendo o mais, a areia, que juntamente com a água forma uma massa densa, coesa e resistente, que é amplamente utilizada na construção civil. Suas aplicações são diversas como rejuntamento, revestimentos, pisos, injeções e recuperações estruturais (PETRUCCI, 1998).

De acordo com Paiva (2009) para se obter uma argamassa de qualidade, evidenciado qual a sua finalidade de aplicação, esta deve ter características como: boa resistência mecânica, impermeabilidade, aderência,

compacidade, porosidade, constância de volume e ser durável. Mas esses atributos estão diretamente ligados às quantidades e a qualidade dos materiais envolvidos na sua produção.

Ainda segundo Paiva (2009) é fundamental a observação do estado fresco das argamassas, uma vez que as características adquiridas neste estado são fatores importantes e geram reflexos no estado endurecido, principalmente quanto a resistência mecânica e propriedades físicas.

2.1.2 Trabalhabilidade e consistência

A trabalhabilidade é definida como sendo a facilidade da argamassa em ser misturada, transportada, aplicada e acabada sem que a mesma perca sua homogeneidade. Também é definida como a quantidade de trabalho necessário para vencer o atrito interno das partículas constituintes da argamassa para manter o fluxo na confecção (PETRUCCI, 1998; CARASEK, 2010; NEVILLE e BROOKS, 2013; BAUER, 2015).

Segundo Carasek (2010) a trabalhabilidade é uma propriedade complexa, resultante de uma série de fatores de outras propriedades, tais como: consistência, plasticidade, retenção de água, de consistência, coesão, exsudação, densidade de massa e adensamento inicial, no quadro 1 é apresentado essas propriedades com suas definições.

Quadro 1 - Propriedades relacionadas com a trabalhabilidade das argamassas

Propriedades	Definição
Consistência	É a maior ou menor facilidade da argamassa deformar-se sob ação de cargas.
Plasticidade	É a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.
Retenção de água e de consistência	É capacidade de a argamassa fresca manter sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam a perda de água.
Coesão	Refere-se as forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa e as ligações químicas da pasta aglomerante.
Exsudação	É a tendência de separação da água (pasta) da argamassa, de modo que a água sobe e os agregados descem pelo efeito da gravidade. A argamassa de consistência fluida apresenta maior tendência a exsudação.
Densidade de massa	Relação entre a massa e o volume de material.
Adesão inicial	União inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.

Fonte: Adaptado de Carasek (2010).

Para Paiva (2009) há diversos fatores que influenciam na trabalhabilidade podendo ser destacados: o teor de água na mistura, que é um dos fatores preponderantes, o consumo de cimento, aditivos utilizados, tipos de agregados, fator água cimento, ou seja, praticamente todos os componentes inerentes a confecção de um compósito cimentício.

Apesar de ser uma característica tão importante para confecção de argamassas e concreto, a trabalhabilidade é uma característica com dificuldade em ser controlada, uma vez que suas características estão ligadas a outras propriedades inerentes aos compósitos cimentícios.

2.1.3 Segregação e exsudação

Segregação é definida como a separação dos elementos constituintes do concreto fresco, de forma que eles não estejam uniformemente distribuídos. Existem dois tipos de segregação, sendo a primeira caracterizada no estado endurecido onde há separação entre a pasta cimentícia e o agregado miúdo e a segunda no estado fresco onde surge indícios de água na superfície das argamassas antes do lançamento e adensamento (MEHTA e MONTEIRO, 2005; NEVILLE e BROOKS, 2013; BAUER, 2015).

Já a exsudação, que pode ser definida como uma forma de segregação, ocorre quando uma parte da água de amassamento de concretos recém lançados migram para sua superfície. Tal fato se deve porque os materiais da mistura são incapazes de reter toda a água do amassamento quando os mesmos tendem a se direcionar ao fundo das formas (PETRUCCI, 1998; NEVILLE e BROOKS, 2013; BAUER, 2015).

É fato que o controle da água de amassamento deve ser feito com total rigor, uma vez que o aumento ou a diminuição da água reflete diretamente na resistência, durabilidade, trabalhabilidade de concretos e argamassas.

2.1.4 Constituintes das Argamassas

2.1.4.1 Cimento Portland

O cimento é um dos materiais mais utilizados no mundo, tendo seus primeiros relatos de utilização nos tempos bíblicos, onde as argilas da época já eram utilizadas como o primeiro aglomerante hidráulico, onde foram confeccionados os primeiros tijolos de cerâmicos, conhecidos até hoje como adobe. Mas foram os romanos que teriam desenvolvido o primeiro cimento hidráulico, sendo um material que endurece em presença de água. E em 1824 Joseph Aspdin desenvolve o que hoje conhecemos como cimento Portland (PETRUCCI, 1982; NEVILLE e BROOKS, 2013).

Segundo Battagin e Battagin (2010) o uso do cimento na construção civil é expressivo por ter inúmeras aplicações, assim pode preparar pastas, argamassas, concretos, grautes (concreto com capacidade de preencher vazios e aumentar a capacidade portante) entre outros compósitos que compõem a execução de artefatos como blocos, telhas, tubos, pavimentos, postes, mourões de cerca entre outros.

2.1.4.1.1 Produção e composição do cimento Portland

O cimento *Portland* é caracterizado por Neville e Brooks (2013) como a mistura íntima entre argila ou outros materiais silicosos, calcário, alumina e outros materiais constituídos de óxido de ferro. Essa massa é queimada a altas temperaturas, chamada temperatura de clinquerização, tendo seu resultado final o clínquer. Após o resfriamento do material, é adicionada a gipsita (sulfato de cálcio), sendo moído novamente até se tornar o cimento *Portland* comercial.

Quatro compostos básicos se destacam como os principais constituintes do cimento, sendo eles: silicato dicálcico (C_2S), silicatos tricálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) e o ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF). Ainda existem outros

compostos secundários presentes no cimento como MgO, TiO₂, MnO₂, K₂O e Na₂O, mas deve-se ter atenção especial quanto aos óxidos de sódio e potássio, conhecido como os álcalis do cimento (NEVILLE e BROOKS, 2013).

Mehta e Monteiro (2005) destacam que embora o cimento seja constituído basicamente de elementos compostos de cálcio, os resultados da análise química apresentam alguns óxidos, conforme quadro 2.

Quadro 2 – Principais Óxidos do Cimento

Óxidos	Abreviação	Composição	Abreviação
CaO	C	3CaOSiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO·3Al ₂ O ₃ ·SO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₃	S	3CaO·2SiO ₂ ·3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CŠH ₂

Fonte: Adaptado pelo autor de Mehta e Monteiro (2005)

Mehta e Monteiro (2005), Neville e Brooks (2013) e Bauer (2015) relatam que a composição química do cimento é baseada diretamente na proporção dos silicatos e aluminatos. A medição desses componentes pode ser determinada a partir do resultado de análise em óxidos, sendo tal operação denominada de determinação da composição potencial do cimento, onde se utiliza normalmente o cálculo chamado método de Bongue. O cálculo de Bogue segue a seguinte equação:

$$\%C_3S = 4,07 \times \%CaO - 7,60 \times \%SiO_2 - 6,72 \times \%Al_2O_3 - 1,43 \times \%Fe_2O_3 - 2,85 \times \%SO_3 \quad (1)$$

$$\%C_2S = 4,07 \times \%CaO - 7,60 \times \%SiO_2 - 6,72 \times \%Al_2O_3 - 1,43 \times \%Fe_2O_3 - 2,85 \times \%SO_3 \quad (2)$$

$$C_3A = 2,65 \times \%Al_2O_3 - 1,69 \times \%Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$\%C_4AF = 3,04 \times Fe_2O_3 \quad (4)$$

Bauer (2015) reforça que o conhecimento das proporções dos compostos constituintes cimento deve ser centrado na relação entre os seus compostos, suas propriedades finais e seus produtos finais (concretos e argamassas).

2.1.4.1.2 Hidratação do cimento

Bullard *et al.* (2011) descrevem que o mecanismo cinético da hidratação é objeto de estudo acadêmicos e práticos, onde, do ponto de vista acadêmico, os fenômenos químicos e a microestrutura da hidratação do cimento são bastante complexos, assim o estudo fundamental da hidratação oferece desafios científicos em métodos de modelagem e técnicas experimentais. Já no ponto de vista prático, o impulso por produzir materiais mais cimentícios mais sustentáveis tem norteados estudos para a mistura de adições minerais de secundária oriundo de subprodutos de outros processos industriais. Para tal sucesso o conhecimento mais aprofundado da cinética básica do cimento é fundamental.

Bauer (2015) expõe que as propriedades químicas do cimento estão diretamente ligadas ao endurecimento pelo processo de hidratação. As reações e os compostos envolvidos nesse processo de endurecimento ainda não são conhecidas com precisão, entretanto é aceito que o processo compreende a dissolução da água, precipitações de cristais e gel com hidrólise, além da hidratação dos seus compostos.

Os dois principais compostos do cimento, como discorrem Neville e Brooks (2013), são os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S), sendo que a hidratação do primeiro ocorre mais rápido que o segundo. Ainda é presente nos cimentos comerciais algumas impurezas de óxidos dentro do clínquer que impõe forte influência nas propriedades dos silicatos hidratados.

Ainda que em menor proporção, cerca de 6 a 10% na maioria dos cimentos comerciais, o aluminato tricálcico (C_3A) é o composto que apresenta fase mais reativa na hidratação do cimento, fator esse que influencia

diretamente no tempo de pega do cimento. É devido a presença desse aluminato que é adicionado a gipsita ou outra forma de sulfato de cálcio, para formação da etringita, retardando assim sua hidratação (NEVILLE e BROOKS, 2013). De acordo com Carvalho (2002) *apud* Sousa Neto (2014) a reação do C_3A é imediata com a água, formando rapidamente cristalinóides hidratados tais como: C_3AH_6 , C_4AH_9 , C_2AH_8 . Ocorre também que nessa formação de cristais se libera grande quantidade de calor e perda da trabalhabilidade da mistura, tornando o cimento impróprio, por isso, para retardar seu efeito, é adicionado uma pequena quantidade de gipsita.

2.1.4.2 Água de amassamento

A água é o material que está diretamente relacionado com a trabalhabilidade de concretos e argamassas, além de ser a responsável pela hidratação dos compostos do cimento. É usual falar que toda água própria para beber pode ser utilizada na confecção de concretos e argamassas (PETRUCCI, 1998). Mas Neville e Brooks (2013) lembram que nem toda água considerada potável pode ser utilizada como água de amassamento, uma vez que o alto teor de potássio e sódio dentro da água pode acarretar no surgimento da reação álcali agregado.

Neville e Brooks (2013) explicam ainda que a qualidade da água é importante pois está ligada diretamente a resistência de concretos e argamassas, visto que eventuais impurezas geram perda de resistência, podem corroer sua armadura, bem como propiciar o aparecimento de manchas na superfície das peças de concreto.

Em geral a água usada para o amassamento do concreto não deve possuir impurezas que comprometam a sua reação com o cimento. Pequenas impurezas são toleradas, pois na maioria das vezes não representam danos ao concreto. Dessa forma a água que contenha menos de 2.000 partes por milhão (0,02% em peso) de sólidos dissolvidos pode ser usada como água de amassamento dos concretos (PETRUCCI, 1998, NEVILLE e BROOKS, 2013, BAUER, 2015).

Petrucci (1998) resume, conforme figura 2, a quantidade máxima de impurezas tolerável para que a água seja aceita como água de amassamento de concretos e argamassas.

Figura 2 - Impurezas e concentrações na água de amassamento para matriz cimentícia

Impurezas	Concentração máxima tolerável na água de amassamento	
Carbonato e bicarbonato de sódio e potássio	1.000 ppm	(0,1 %)
Cloreto de sódio	20.000 ppm	(2 %)
Sulfato de sódio	10.000 ppm	(1 %)
Bicarbonato de sódio de cálcio e magnésio	400 ppm	(0,04 %)
Cloreto de cálcio	40.000 ppm	(4 %)
Sais de ferro	40.000 ppm	(4 %)
Iodato de sódio, fosfato de sódio, arseniato de sódio e borato de sódio	500 ppm	(0,05 %)
Sulfito de sódio	100 ppm	(0,01 %)
Ácidos inorgânicos, tais como clorídrico, sulfúrico, etc	10.000 ppm	(1 %)
Hidrato de sódio	10.000 ppm	(1 %)
Partículas em suspensão	2.000 ppm	(0,2 %)
Água do mar (sais)	30.000 ppm	(3 %)
Águas industriais (sólidos)	4.000 ppm	(0,4 %)
Águas de esgotos (matéria orgânica)	20 ppm	(0,002 %)
Açúcar	500 ppm	(0,05 %)

Fonte: Petrucci (1998).

2.1.4.3 Agregado miúdo

Agregado é definido como o material particulado, incoesivo, composto por partículas de tamanhos diversos, com atividades químicas praticamente inóculas. Seu nome é de uso generalizado para o uso de concreto. Tendo sua aplicação tanto em obras de infraestrutura rodoviária quanto na confecção de argamassas e concretos (PETRUCCI, 1998; BAUER, 2015).

Sousa Neto (2014) ressaltam que a seleção do agregado é fundamental para a boa qualidade do concreto, uma vez os agregados podem se tornar o elo fraco do composto quando da necessidade de aumento da resistência à compressão de projeto.

É entendido como agregado miúdo normal ou corrente a areia quartzosa ou o pedrisco resultante da britagem de rochas, com tamanho de partículas abaixo de 4,8 mm e que seu percentual não ultrapasse 15% dessa malha de abertura (PETRUCCI, 1998). Bauer (2015) define que a areia, geologicamente, é um sedimento que varia seu tamanho de 0,06 a 2,0mm, mas para a construção civil essa variação muda, sendo entendido como o material que varia entre 0,15 e 4,8 mm.

Segundo Mehta e Monteiro (2005) as propriedades do agregado miúdo não afetam somente a proporção da mistura das argamassas, mas também as propriedades no estado fresco e endurecido da pasta. As características que afetam o intervalo entre o estado fresco e endurecido podem ser divididas em três categorias baseadas na microestrutura e processamento de fatores:

- 1- Características dependentes da porosidade: densidade, grau de absorção de umidade, resistência, dureza e módulo de elasticidade;
- 2- Características dependentes da exposição prévia e fatores de processamento: tamanho, forma e textura das partículas;
- 3- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, modo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

2.1.4.4 Adições minerais – fíleres e pozolanas

A aplicação de aditivos minerais, ou adições minerais, em argamassas e concretos tem baseado inúmeros trabalhos nas últimas décadas com o intuito de melhorar as propriedades físicas e mecânicas de seus compósitos como também a redução do consumo de cimento, por substituição do mesmo por tais materiais. Além do mais, a maioria desses materiais são resíduos de produtos industrializados ou da agroindústria, que pode trazer um viés de

sustentabilidade, redução do custo de produção e redução do impacto ambiental (KANNING *et al.*, 2014).

Segundo Cavalcanti (2006) apud Sousa Neto (2014) as adições minerais são definidas como materiais finamente moídos incorporados a concretos e argamassas para alcançar finalidades e propriedades específicas, podendo melhorar a trabalhabilidade dos compósitos cimentícios, a expansão devido a reação álcali agregado e ataque a sulfatos. Çakir e Akoz (2008) descrevem que as adições minerais melhoram a resistência à compressão a estrutura dos poros e a permeabilidade das argamassas e concretos com o tempo.

Quanto a sua classificação as adições minerais podem ser divididas em duas, as predominantemente inertes e as predominantemente reativas, ou, fíleres e pozolanas respectivamente. As pozolanas tem contribuição na formação dos hidratos, são elas: pozolanas naturais, cinzas volantes, cinzas da queima do bagaço da cana de açúcar, cinza da casca de arroz, sílica ativa, metacaulin entre outras. Já os fíleres, são responsáveis por uma melhora física, ajudando na compactação do compósito, preenchendo vazios, sendo eles: calcários, resíduo de serragem de mármore, o quartzo entre outros (SOUSA NETO, 2014).

2.1.4.5 Utilização de adições minerais em compósitos cimentícios

A influência benéfica das adições minerais em compósitos cimentícios já foram definidas anteriormente, onde sua importância está no melhoramento das propriedades do estado fresco e endurecido dos compósitos cimentícios. Diversos autores estudaram a introdução dessas adições em concretos e argamassas como material de enchimento ou material para substituição parcial do cimento.

Silva *et al.* (2007) testaram a influência das expansões da reação álcali agregado em argamassa de cimento Portland com a utilização da cinza da casca de arroz em substituição parcial ao cimento Portland. Os autores

relataram que as expansões sofreram redução com a introdução das cinzas da casca de arroz.

Senhadji *et al.* (2014) analisaram a utilização de pozolana natural, fumo de sílica e pó de calcário incorporada em diversas faixas de porcentagem de substituição do cimento das argamassas de cimento Portland, onde observaram a influência de tais adições quanto a resistência mecânica, resistência a ataque a ácidos e a microestrutura nas argamassas estudadas. As resistências a compressão sofreram queda na maioria das adições, mas as resistências a ataque dos ácidos foram melhoradas.

Haruehansapong *et al.* (2014) comparou as resistências a compressão de argamassas contendo fumo de sílica e partículas de nanosílica em substituição parcial do cimento das mesmas. Puderam observar que aos 28 dias de cura, as argamassas com substituição de 9% de cimento por nanosílica e fumo de sílica obtiveram resultados melhores que as amostras controles sem substituição, sendo ainda a nanosílica superior ao se comparar com o sumo de sílica.

Zahedi *et al.* (2015) também estudaram a influência da nanosílica em argamassas, mas o comparativo para sua atividade pozolânica foi testada com a cinza da casca de arroz em substituição parcial do cimento, onde os resultados ao ensaio de resistência a compressão se mostraram melhores que as amostras controle nas argamassas que tiveram adicionados apenas a nanosílica.

2.2 VIDRO

O vidro é utilizado desde os primórdios da humanidade. Na Idade da Pedra o vidro era utilizado em seu estado natural (obsidiana) para a fabricação de pontas de lanças, flechas e facas. O início do seu processo de fabricação é incerto, mas relatos demonstram que os fenícios teriam sido os primeiros povos a desenvolver técnicas de produção (PETRUCCI, 1982).

Sichieriet *al.* (2010) e Bauer (2015) expõem que provavelmente os primeiros indícios do vidro se deu na Síria, aproximadamente 3.000 anos a.C. Mas o certo é que já em 1.400 a.C. os egípcios já produziam vasos, enfeites bem como outros materiais similares de vidro. Sendo posterior, já na Roma antiga, o emprego do vidro na fabricação de vasos, garrafas, jarros. E o vidro foi usado como proteção de janelas nos séculos III e IV da era cristã, como observado nas ruínas de Pompéia.

2.2.1 Estrutura química do vidro

Segundo Petrucci (1982), o vidro é um material complexo, sendo considerado como uma solução sólida de silicatos alcalino-terrosos em silicatos alcalinos livres, sendo, às vezes, a sílica, substituída por B_2O_3 ou outros anidridos.

Sichieriet *al.*(2010) definem o vidro com sendo um produto fisicamente homogêneo obtido por resfriamento de massa inorgânica em fusão, que endurece sem cristalizar através de um aumento contínuo de viscosidade, em outras palavras, é um sólido não cristalino que apresenta transição vítrea.

Schmitzet *al.* (2011) descrevem que o vidro é um produto obtido pela mistura de sílica (óxido de silício), carbonato de sódio, dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) e calcário ($CaCO_3$) a uma temperatura de até 1600 °C. Posteriormente ao resfriamento, a mistura se solidifica, sem a formação de cristais. O estado não líquido e não sólido faz do vidro um material sólido amorfo.

O vidro difere-se de sólidos cristalinos quanto a sua estrutura atômica por não apresentar átomos empilhados, estruturas regulares e repetidas. Assim os vidros são classificados como materiais sólidos não cristalinos ou amorfos. São obtidos por processo de fusão (em torno de 1.250 °C) do dióxido de silício (SiO_2), do carbonato de sódio (Na_2CO_3) e do carbonado de cálcio ($CaCO_3$) (SOUSA NETO, 2014).

Bauer (2015) lembra que a composição química do vidro pouco mudou em 5.000 anos, sendo o vidro mais utilizado no mundo o calco-sódico,

constituído de 70% de SiO_2 , 15% de óxido de sódio (Na_2O) e 10% de óxido de cálcio (CaO) e outros 5% de outros óxidos.

Os vidros são enquadrados no grupo dos materiais cerâmicos, sendo sua aplicação mais usual em recipientes, janelas, lentes e a fibra de vidro, sendo constituídos de silicatos não cristalinos, notavelmente CaO , Na_2O , K_2O e Al_2O_3 . Um vidro soda cal comum consiste basicamente de 70% de sílica e seu restante constituído de Na_2O (soda) e CaO (cal) (CALLISTER, 2002). A tabela 1 mostra os principais materiais vítreos produzidos pela indústria.

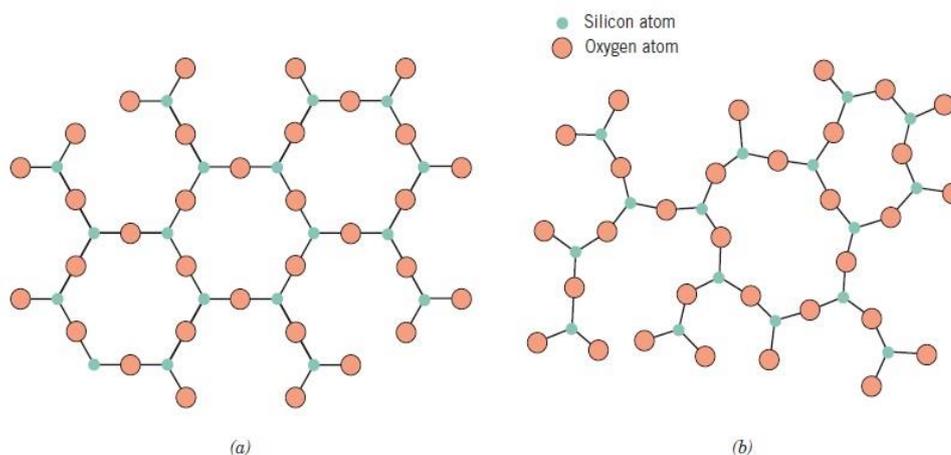
Tabela 1 - Composições de alguns vidros de silicatos

Composição (%)										
Vidro	SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	CaO	MgO	K_2O	ZnO	PbO	Outros
Sílica Vítria	100									
Borossilicato	76	13	4	5	1					1
Janela	72		1	14	8	4				1
Recipientes	73		2	14	10					1
Fibra (Vidro-E)	54	8	15		22					1
Esmalte de Cerâmica	60		16		7		11	6		
Verniz de Cobre	34	3	4				17		42	

Fonte: Adaptado de Shackelford (2008).

O vidro tem qualidades singulares em sua estrutura atômica, pois não é um líquido, mas também não assume a característica de um sólido cristalino, sendo caracterizado como um líquido super-resfriado (PETRUCCI, 1982). A figura 3 exemplifica bem a estrutura atômica do vidro, como sendo um material amorfo em comparação a um sólido cristalino.

Figura 3— Estrutura de sólido cristalino (a) e do vidro (b).



Fonte: Callister (2002)

2.2.2 Produção e utilização do vidro

A produção do vidro é remota, com os primeiros indícios há 5.000 anos a.C. nas civilizações antigas do Egito, Fenícia, Assíria, Babilônia, Grécia e Roma. Apenas por volta de 250 a.C. o vidro teve seu primeiro grande impulso, com a descoberta, na Síria, do modo de soprar o vidro. O método foi o responsável pelo barateamento da sua produção, sendo ainda fundamental para difusão e popularidade do material (PETRUCCI, 1982).

Uma grande variedade de vidros é produzida, dependendo da sua composição química e dos aditivos acrescentados a sua produção, tais como: sílica vítrea, silicatos alcalinos, vidros de sódio-cal (recipientes, lâmpadas e louças temperadas), vidros de borossilicato (vidros para laboratório), vidros de bário (visores de televisores) e vidros de aluminossilicatos (fibras de vidro e resistores) (JANI e HOGGLAND, 2014).

Cabe salientar ainda que o vidro é um material de grande utilidade na construção civil, pelas suas características de dureza, transparência, durabilidade e também por ser um material 100% reciclado. Segundo Rosa *et al.* (2007) o cenário mundial do consumo de vidro plano no ano de 2005 foi de aproximadamente 41 milhões de toneladas (cerca de 5 bilhões de m²); esse

volume foi responsável pela movimentação de US\$ 19 bilhões, onde 70% desse valor se deve a indústria da construção civil (portas, janelas e fachadas).

No ano de 2006, no Brasil, a indústria de vidro soda-cálcicos para os diversos setores industriais (construção, automóveis, moveis, etc) tinha uma capacidade instalada de produção de cerca de 3,1 milhões de toneladas. Ainda que inferior ao consumo em países como Estados Unidos e a União Europeia, Rosa *et al.* (2007) explica que o Brasil apresenta uma ascensão quanto ao consumo do vidro, cujo consumo anual dos brasileiros é estimado em 12 kg.

2.2.3 Resíduo sólido de vidro

O aumento significativo da necessidade de produtos de origem industrial tem gerado resíduos em toda a cadeia produtiva, desde o processo de fabricação até o descarte pelos consumidores. Alguns desses produtos são extraídos de fontes renováveis, o que favorece a reciclagem dos seus resíduos, entretanto os materiais produzidos pela indústria têm sido maiores que a capacidade de reciclagem, cujo processo de coleta, transporte e seleção se mostra oneroso, o que muitas vezes encarece o produto e inviabiliza a reciclagem (PAIVA,2009).

Outro ponto importante levantando por Gonçalves (2005) é a escassez de matérias primas para a confecção de novos produtos, destacando a indústria do concreto, que tem tido dificuldades de encontrar jazidas de agregado perto das construções nos grandes centros urbanos, aumentando muito o preço final dos produtos cimentícios. Nessa vertente, o Brasil tem aumentado significativamente os estudos quanto a reutilização dos resíduos industriais como pneus, cerâmicas, restos de demolições e vidro entre outros (GOLÇALVES, 2005; BARATA, 1998; ÂNGULO, 2005; PAIVA 2009; SOUSA NETO, 2014).

A NBR 10.004/2004 classifica os resíduos quanto aos seus potenciais de riscos ao meio ambiente e à saúde pública, para que sejam adequadamente geridos. A Norma define resíduo sólido como:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (NBR 10004/2004, p. 7).

A NBR 10004/2004 ainda classifica os resíduos como sendo:

- Classe I – Resíduos Perigosos: resíduos que devido as suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas podem apresentar riscos à saúde pública e/ou ao meio ambiente, aumentando o índice de doenças e de mortalidade;
- Classe II A – Não Perigosos e não inertes: Aqueles que nem se classificam como perigosos (classe I) ou não perigosos inertes (classe II B), tendo características como: solubilidade em água, combustibilidade e biodegradabilidade;
- Classe II B – Não Perigosos inertes: Qualquer resíduo que em contato com água desionizada ou destilada a temperatura ambiente não apresenta solubilidade superior aos padrões de potabilidade da água, exceto os aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

Ainda de acordo com NBR 10.004/2004 o resíduo de vidro pode ser classificado como um material de classe II B – não perigoso inerte, de fácil manuseio para o processo de coleta, separação e reciclagem.

2.2.4 Vidro e sua utilização em matriz cimentícia

O uso de vidro como componente de argamassa e de concreto, quer seja como agregado miúdo, material pozolânico, ou fíler está limitado, segundo

Ducman *et al.* (2002), à possibilidade de surgimento da Reação Álcali-Agregada (RAA), pois a composição básica do vidro é de 70% de sílica. Essa combinação de alto teor de sílica e a estrutura amorfa do vidro, segundo os autores, é potencialmente deletéria e pode reagir expansivamente com o cimento, mesmo que esse tenha baixos teores de álcalis.

Há uma evolução significativa para introdução desse resíduo sólido em compósitos cimentícios, cuja uma das soluções mais estudadas para evitar a RAA encontra-se na granulometria das partículas do vidro, que podem ser finamente moídas ou adicionadas a outros materiais de propriedades pozolânicas, que já são caracterizados como inibidores dessa reação deletéria.

A busca por medidas para descarte de materiais de cunho industrial de maneira mais eficiente ou a sua reciclagem tem elevado a procura desses materiais e incentivado pesquisas nos últimos anos. Segundo Paiva (2009) a adição mineral em concretos e argamassas tem contribuído para a melhora do comportamento da matriz cimentícia no estado fresco e endurecido, como a resistência à compressão, exsudação, segregação e trabalhabilidade.

Segundo Cavalcanti (2006) os aditivos minerais, ou adições minerais, são geralmente produtos finamente moídos que são incorporados aos compósitos cimentícios com objetivo de melhorar algumas características específicas. Mehta e Monteiro (2005) relatam que esse material é introduzido na faixa de 20% a 70% da massa total do cimento com o objetivo de reduzir custos, melhorar a trabalhabilidade do concreto em seu estado fresco, por vezes melhorando a fissuração térmica, ajudando ainda no controle das expansões quanto a reação álcali-agregado e aos ataques de sulfatos.

O vidro enquadra-se como uma adição mineral, por ser um material composto basicamente por sílica em fusão, onde no final do processo de fabricação apresenta-se como material rico em sílica amorfa indicando potencial de pozolanicidade, quando finamente moído.

Para Shao *et al.* (2000) o resíduo de vidro que não é reciclado representa um problema para muitos municípios, cuja prática mais corriqueira de eliminação é o seu depósito em aterros sanitários, sendo impérios, portanto, a necessidade de utilização desses resíduos.

Vários autores têm estudado formas de introduzir o vidro como material constituinte de concretos e argamassas, tanto na substituição parcial do cimento, quanto na substituição parcial ou total de agregados miúdos, graúdos ou *filler* (SHAO *et al.*, 2000; DUCMAN e MLADENOVIC, 2002; PARK *et al.*, 2004; MATOS e SOUSA-COUTINHO, 2012).

A preocupação com o meio ambiente e a busca de novos materiais para compor concretos e argamassa tem sido a busca de autores para a utilização do vidro. Shao *et al.* (2000) por exemplo, usaram vidro proveniente da indústria de lâmpadas fluorescentes do Canadá em substituição parcial do cimento na confecção de concreto, analisando três faixas granulométricas (150 μm , 75 μm e 38 μm) de vidro moído afim de avaliar atividade pozolânica do vidro, bem como a reação álcali agregado envolvendo as granulometrias. Já Park *et al.* (2004), diante da preocupação de do impacto ambiental causado pela escassez de reuso do resíduo de vidro industrial, estudaram a incorporação de um resíduo proveniente de garrafas utilizadas na Coréia do Sul em substituição de até 70% do agregado miúdo.

Corinaldesi *et al.* (2005) utilizaram resíduo de vidro descartado na região de Toscana na Itália, em substituição de 30% a 70% do agregado miúdo de argamassas cimentícias, a fim de avaliar suas microestruturas e propriedades mecânicas, detectando que não há reação deletéria (reação álcali agregado) quando as partículas de vidro utilizadas eram inferiores a 100 μm . Além disso, observou-se que essa granulometria também era capaz de melhorar as propriedades mecânicas da argamassa.

Park *et al.* (2004) analisaram a substituição nas proporções de 30%, 50% e 70% do agregado natural fino por resíduo de vidro proveniente de garrafas de variadas cores. Perceberam que a trabalhabilidade é reduzida com o aumento do resíduo do vidro, bem como há perda de resistência à compressão devido a esse aumento, bem como o surgimento da reação álcali agregado.

Shayan e Xu (2006) relatam que já é conhecido o desempenho satisfatório do pó de vidro como material pozolânico, mas que ainda não se tinha testado o uso desse resíduo em campo. Assim foram confeccionadas dez

lajes de concreto (1,5 x 2,5 x 0,25 m) com resistência de projeto de 40 MPa, substituindo o cimento pelo resíduo moído de vidro, proveniente do subúrbio de Sidney, nas proporções de 20% e 30%. Os autores puderam observar que aos 404 dias de confecção todas as peças de concreto ultrapassaram os 40 MPa de referência.

Lam *et al.* (2007) avaliaram a incorporação de vidro moído como agregado fino na confecção de blocos pré-moldados de concreto para pavimentação, cujos percentuais de substituições seguiram as faixas de 25%, 50% e 75%. Foram analisadas as expansões devido a RAA, tendo o estudo demonstrado que é possível adicionar até 75% de vidro aos blocos de concreto, desde que se adicione 10% de cinza da queima de combustível ou que se adicione 25% de vidro moído à mistura. Quanto à resistência mecânica à compressão, todas os blocos pré-moldados passaram dos 50 MPa aos 28 dias de cura.

Nassar e Soroushian (2012) avaliaram a substituição de 20% do cimento por vidro finamente moído, com partículas inferiores a 13 μm , com a intenção de reduzir o problema de absorção de água em concretos com agregado reciclado. Segundo os autores o agregado reciclado absorve entre 2 e 3 vezes mais água do que os agregados naturais, assim o resíduo do vidro tem a função de reagir com o hidróxido de cálcio e formar o silicato de cálcio, cuja reação é responsável pela melhoria da qualidade da pasta sobre o agregado reciclado, favorecendo a resistência, durabilidade e estabilidade dimensional do agregado reciclado.

Matos e Sousa-Coutinho (2012) expõem que na produção do cimento é necessária grande quantidade de energia, sendo uma indústria responsável por cerca de 5% (cinco por cento) de todo dióxido de carbono emitido no mundo. Assim as autoras estudaram a possibilidade de substituir parte do volume do cimento por resíduo moído de vidro nas faixas de 10% a 20%, cujos focos de análise foram as atividades pozolânicas, as propriedades mecânicas e a reação álcali agregado.

Limbachiya (2009) utilizou o vidro derivado de garrafas de várias cores que foram coletadas de bares e restaurantes, para a confecção de areia de

vidro lavada, a fim de testar suas propriedades no concreto. Após a separação e moagem das garrafas em partículas inferiores a 5 mm, foram testadas as substituições nas faixas de 0%, 15%, 20%, 30% e 50% do agregado miúdo natural pelo vidro lavado moído na confecção de concretos. Os resultados indicam que a trabalhabilidade do concreto foi reduzida quando as porcentagens foram superiores a 20%. Já a resistência mecânica mostrou-se próxima do traço referência, com uma substituição de 15%.

Khmiri *et al.* (2013) usaram vidro proveniente de garrafas de vidro reciclado para testar as propriedades pozolânicas do vidro em substituição de 20% do cimento nas argamassas. O vidro moído foi separado em quatro grupos, o primeiro com tamanho entre 100 à 80 μm , o segundo entre 80 à 40 μm , o terceiro com 40 a 20 μm e o quarto com partículas abaixo de 20 μm . A atividade pozolânica, segundo os autores, foi maior com as partículas inferiores a 20 μm , chegando a 102% de atividade pozolânica aos 90 dias.

Zhao *et al.* (2013) testaram a viabilidade do uso do vidro proveniente de tubos de vidro de raio catódicos em substituição do agregado miúdo em concretos de alta densidade. Foram avaliados a substituição de 0%, 25%, 50% e 75% da areia, sendo ainda adicionado ao concreto um percentual de 15% de cinzas volantes como forma de mitigação da possível reação álcali agregado do vidro com o cimento. O estudo mostrou que a trabalhabilidade do concreto foi aumentada à medida que a porcentagem de vidro aumentava, e houve uma queda na resistência à compressão, sendo assim viável a utilização do resíduo de vidro.

Du e Tan (2014) estudaram a confecção de argamassas com 100% de vidro como agregado miúdo, a fim de verificar as condições quanto a reação álcali agregado da argamassa. Foram verificadas as condições quanto ao método acelerado da barra de argamassa (ASTM C 1260). O estudo mostrou que a utilização de 100% de vidro como agregado miúdo pode ser realizada desde que se tenha adição de materiais suplementares como, cinzas volantes (10% a 50% de substituição), 45% a 60% de escoria de alto forno, 12,5% de fumo de sílica.

Oliveira *et al.* (2015) examinaram a substituição de 20% do cimento de argamassas de revestimento por vidro com partículas inferiores a 149 μm , sendo confeccionadas argamassas com traços de 1:4, 1:5 e 1:6 a fim de verificar as substituições em comparação aos traços referência. Os resultados mostraram que o traço 1:5 com substituição de 20% apresentou um ganho de resistência em relação a todas as argamassas. Assim a incorporação do vidro é relatada como possível. Segundo ainda os autores, o vidro pode ser utilizado sem a preocupação ao surgimento da reação álcali agregado, uma vez que as partículas inferiores a 150 μm desenvolvem na pasta hidratada propriedades pozolânicas que mitigam a surgimento da reação.

Pode-se observar que a utilização do resíduo de vidro, se mostra muito vantajoso quanto a sua introdução em compósitos cimentícios, por ser um material rico em sílica amorfa, e se utilizado em uma granulometria fina, ou seja, abaixo de 100 μm como retratam os autores mencionados anteriormente, é um importante material pozolânico, que pode ajudar nas propriedades mecânicas de concretos e argamassas pelo efeito pozolânico, bem como também melhorar o empacotamento da matriz, uma vez que suas partículas finas se mostram bons para preencher os vazios da matriz.

2.3 REAÇÃO ALCALI AGREGADO

A Reação Álcali-Agregado (RAA) tem sua definição, em termos gerais, com uma reação química que ocorre na estrutura interna do concreto, onde são envolvidos os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e alguns minerais reativos de agregados utilizados na confecção de concreto, tendo como resultado principal a formação de um gel que, em presença de água, expande gerando fissurações, deslocamentos até comprometimento da estrutura do concreto (HASPARYK, 2005).

A Reação Álcali-Agregado pode ser considerada de certa forma uma patologia nova, tendo os primeiros relatos quanto ao seu surgimento na década de 1940, nos estudos de Stanton, quando o pesquisador observou o surgimento de eflorescências brancas em seus experimentos, causando

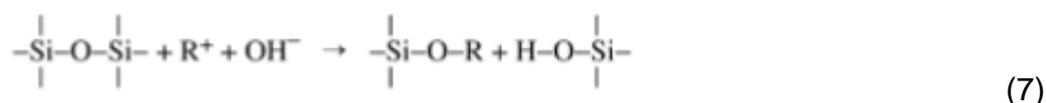
fissurações similares em estruturas reais na Califórnia, observadas nos anos de 1920 e 1930 (BAZANT e STEFFENS, 2000; HASPARYK, 2005; MIZUMOTO, 2009; THOMAS *et al.*, 2011; ESTEVES *et al.*, 2012; DUNANT e SCRIVENER, 2012; SOUSA NETO, 2014; KRIVENKO *et al.*, 2014; RAJABIPOUR *et al.*, 2015).

Segundo Mehta e Monteiro (2005) as fissuras, devido a reação álcali agregado, podem comprometer as propriedades físicas do concreto tais como a resistência a compressão e a elasticidade, afetando, por conseguinte, a durabilidade do concreto.

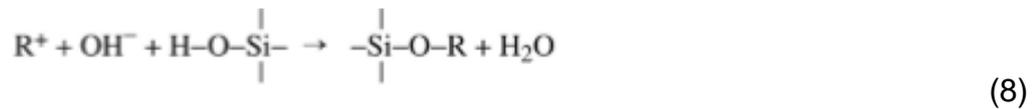
Segundo Sousa Neto (2014) o fator preponderante para o surgimento da RAA é a presença de minerais reativos que constituem o agregado, os quais reagem com os álcalis do cimento. Entretanto esse não é o único fator uma vez que influências externas como a umidade e a temperatura são condições importantes no processo deletério da reação.

Topçu *et al.* (2008) relatam que a RAA é uma reação ocorrida entre óxidos alcalinos constituintes do cimento e o agregado que possui sílica reativa, sendo o resultado a expansão que, segundo os autores, é dividida em duas fases simples: a primeira, devida a reação dos álcalis com a sílica reativa, formando o gel da RAA e a segunda fase que consiste na combinação do gel com a umidade do concreto, gerando assim a expansão da RAA.

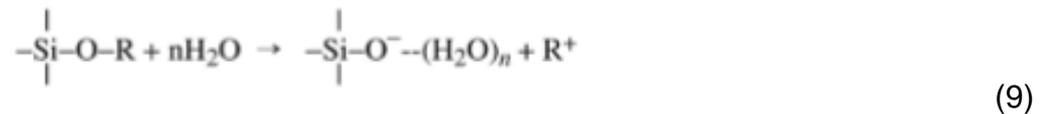
Conforme definido por Ichikawa e Miura (2007) e Saouma *et al.* (2015) a reação álcali agregado é uma reação deletéria entre agregados ricos em sílica e uma solução alcalina que atua nos microporos da estrutura do concreto. A primeira fase da reação é a ruptura das redes de siloxano nos agregados por íons OH^- para gerar silicato alcalino e ácido silícico, conforme equação 7:



R^+ resultante da equação 7 é um íon alcalino como Na^+ e K^+ . O ácido silícico é considerado um ácido fraco, que reage imediatamente com OH^- resultando em silicato alcalino (equação 8).



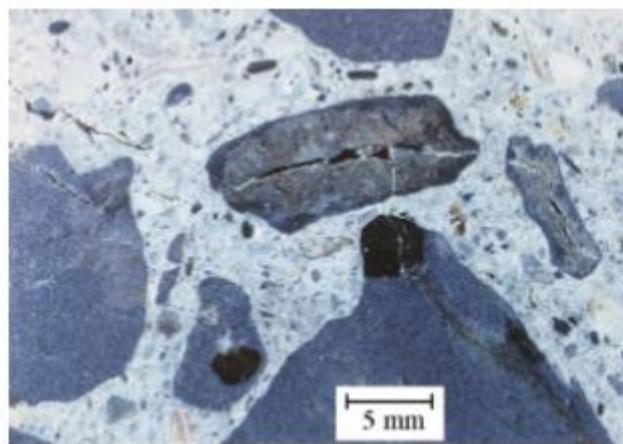
O silicato alcalino (gel de silicato alcalino) é higroscópico, de modo a ser expandido por hidratação (equação 9).



O n da equação 9 representa o número de hidratação de ânion de silicato. A pressão gerada pela reação causa a fissuração do agregado do concreto, provocando deterioração do concreto.

Nas figuras 4 e 5 são apresentadas as microfissuras iniciadas dentro do agregado, sendo posteriormente expandida pelo gel expansivo da reação álcali agregado até encontrar a matriz cimentícia, onde depois é disseminada por toda a estrutura.

Figura 4 - Fissura padrão em concreto com agregado reativo



Fonte: Ichikawa e Miura (2007)

Figura 5 - Reação Álcali-agregado, fissuração do agregado e propagação da fissura para pasta cimentícia



Fonte: Saouma *et al.* (2015)

Segundo Mizumoto (2009) o processo químico envolvido na deterioração pela RAA no concreto é dividido em três formas, de acordo com a mineralogia do agregado reativo: reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato (RASS) e reação álcali-carbonato (RAC). A velocidade e intensidade pelas quais ocorrem as expansões das reações vão depender da concentração e da fase reativa do agregado (KIHARA, 1986).

A reação álcali-sílica (RAS) é a mais conhecida pelo meio técnico, por isso é a mais relatada, tendo como característica a sua ocorrência mais rápida entre as reações álcali-agregado pelas formas minerais de sílica reativa envolvida. As principais formas minerais são: a sílica amorfa ou opala, a cristobalita, os vidros naturais e artificiais, a calcedônia e o quartzo deformado: microcristalino/criptocristalino (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986; HOBBS, 1988; KIHARA 1993; RODRIGUES 1994; ACI 221, 1998).

O processo químico da reação álcali-sílica ocorre pela interação entre a sílica de um agregado reativo e os álcalis vindos do cimento, podendo também ser oriundos de agregados que contenham feldspatos alcalinos, ou outras fontes externas, como as soluções de Na_2SO_4 (sulfato de sódio) e de NaCl (cloreto de sódio) (MIZUMOTO, 2009). Segundo Hasparyk (2005) os álcalis do cimento (Na_2O e K_2O) se apresentam ou não na forma solúvel, sendo os solúveis encontrados nos sulfatos, cuja fonte de fornecimento é mais rápida; os insolúveis apresentam interação química mais lenta pelo processo de hidratação.

A reação álcali silicato (RASS) é uma particularidade das RAA, tendo uma natureza mais lenta e complexa, sendo pouco difundida (POOLE,1992). Segundo Cicinelli (2007) é a reação mais comum encontrada nas barragens brasileiras e em blocos de fundação em prédios de Recife. Esta reação tem o mesmo princípio da RAS, mas, uma vez que os minerais dessa reação estão mais distribuídos pela matriz, ela ocorre lentamente. Os minerais envolvidos nessa reação são silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartzitos) e ígneas (granitos) (SOUSA NETO, 2014).

O terceiro tipo de RAA é a reação álcali-carbonato (RAC) envolvendo uma interação química entre os álcalis do cimento e as dolomitas presentes nos calcários, formando a brucita ($Mg(OH)_2$) processo denominado de desdolomitização, gerando pontos de enfraquecimento na zona de transição da matriz cimentícia devido as fissurações (BICZOK, 1972; GILLOT, 1975; PAULON, 1981; STIEVENARD-GIREAUD, 1987; OZOL, 1994; TAYLOR, 1997).

Segundo Sousa Neto (2014) algumas características quanto a reação álcali agregado interferem na sua intensidade e velocidade de ocorrência, sendo as principais:

- Quanto maior a quantidade de cimento na matriz ou quanto maior a quantidade de álcalis do cimento, as expansões serão aceleradas;
- Quanto mais desordenada e instável for a estrutura molecular do agregado, mais reativo será esse agregado;
- Em meio de alto teor de umidade, ou seja, superiores a 80% ocorrem o aumento da intensidade da reação;
- Estruturas que estão em ambientes úmidos, como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas, tem uma aceleração exponencial para reações álcali agregado;
- As altas temperaturas do ambiente são outro ponto que gera o aumento da RAA.

Segundo Hasparyk (2005) as manifestações mais comuns que as estruturas de concreto atacadas pela RAA apresentam são: fissurações do tipo “mapa”, exsudação do gel na superfície do concreto, bordas ao redor do agregado, preenchimento dos poros com material branco ou vítreo, microfissuração e descoloração do concreto.

Como visto, a reação álcali agregado é uma patologia que ataca concretos e argamassas, ocorrida entre os álcalis dos cimentos e agregados reativos. Por ser uma reação lenta e ocorrida dentro da microestrutura do compósito, não é de fácil identificação e quando apresenta sintomas externos, a estrutura muitas vezes já se encontra comprometida. Assim a melhor forma de evitar a patologia é a prevenção quanto aos componentes empregados. Hasparyk (2005) descreve algumas medidas preventivas:

- a) estudo preliminar da rocha ou agregados a serem empregados na obra;
- b) caracterização química do cimento a ser empregado na obra;
- c) ensaios de laboratório sobre a reatividade da combinação cimento-agregado; e
- d) emprego de adições minerais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são apresentadas as caracterizações dos materiais utilizados na confecção das argamassas de cimento Portland, como também os métodos de análise das caracterizações e das argamassas.

3.1 Materiais

Para os traços de argamassa confeccionados nessa pesquisa foi utilizado Cimento Portland composto de pozolana, CP II – Z – 32 – Ciplan, comercializado na cidade de Porto Velho/RO. As características químicas e físicas do cimento fornecidas pela indústria são apresentadas nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Composição química do cimento CP II – Z – 32.

Composto químico	Percentual (%)
Al ₂ O ₃	6,11
SiO ₂	21,75%
CaO	54,9
MgO	3,52
SO ₃	2,85
Perda ao fogo	5,43
Resíduo Insolúvel	10,73
Equivalente Alcalino	0,84

Fonte: Adaptada pelo autor por dados fornecidos pela indústria.

Tabela 3 – Análises físicas do cimento CP II – Z - 32

Características	Índices
Blaine (cm ² /g)	3,43
Finura #200	3,20%
Finura #325	9,87%
Tempo de Pega (min)	46 min
Resistência à compressão	-
1 dia	11,80 MPa
3 dias	24,60 MPa
7 dias	33,20 MPa
28 dias	42,20 MPa

Fonte: Adaptada pelo autor por dados fornecidos pela indústria.

A água proveniente da rede adutora da Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR, foi utilizada para a confecção de todas as argamassas bem como ensaios de caracterização que fosse normatizado seu uso, seguindo as recomendações das normas NBR 6118/2014 e NBR 15900-3/2009.

A areia utilizada como agregado miúdo foi adquirida junto ao Depósito São Marcos Material Básico Ltda, proveniente do município de Candeias do Jamari, mais especificamente de jazida do Rio Jamari.

O resíduo de vidro foi coletado junto a empresa Guaporé Indústria e Comércio de Vidros Ltda, localizada na região Leste da cidade de Porto Velho.

O aditivo utilizado na pesquisa foi o superplastificante de terceira geração Glenium 51 da BASF, doado pela ROMAT Comércio de Produtos Químicos para Construção Ltda, com as características descritas no quadro 3.

Quadro 3 - Características do SuperplastificanteGlenium 51.

Função	Base Química	Aspecto	Cor	pH	Densidade (g/cm ³)	Sólidos (%)
Aditivo superplastificante de terceira geração para concreto	Éter policarboxílicos	Líquido	Branco turvo	5 à 7	1,066	28,50 - 31,50

Fonte: Próprio Autor, adaptado pelos dados do produto e especificação técnica do fabricante.

A confecção da argamassa embasou-se no trabalho de Paiva (2009) com traço padrão de 1:2:0,40 (relação em massa).

3.2 Métodos

3.2.1 Métodos de ensaios de caracterização do agregado miúdo

Os ensaios realizados nessa pesquisa quanto ao agregado miúdo estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Ensaio de caracterização do agregado miúdo utilizado na pesquisa

Ensaio	Método de Ensaio
Massa Específica	NBR NM 52:2009
Massa Unitária	NBR NM 45:2006
Teor de Material Pulverulento	NBR NM 46:2003
Impureza Orgânica	NBR NM 49:2001
Composição Granulométrica	NBR NM 248:2003
Módulo de Finura	NBR NM 248:2003
Diâmetro Máximo	NBR NM 248:2003
Teor de Argila e materiais Friáveis	NBR 7218:2010

Fonte: Próprio Autor

3.2.2 Métodos de coleta, preparo e caracterização do resíduo de vidro

São apresentados a seguir os métodos de coleta, preparo e caracterização do resíduo de vidro coletado na indústria de vidro, usado nesse trabalho como material substituinte parcial do cimento.

3.2.2.1 Coleta do resíduo industrial

O vidro coletado para essa pesquisa foi proveniente da indústria Guaporé Vidros da cidade de Porto Velho/RO. Por ser a responsável pelo fornecimento de vidro para mais de 70% do mercado da cidade de Porto Velho, sendo dividido entre vidrarias, indústria moveleira e construção civil seus principais consumidores, a empresa foi a escolhida para a coleta do resíduo de vidro.

O resíduo é proveniente do processo de corte e desbastamento dos vidros planos da indústria. Os vidros chegam a indústria em chapas que são separadas por lotes e cores. O primeiro trabalho realizado é o corte das peças encomendadas pelos clientes. As chapas são dispostas na mesa de corte e as peças são cortadas mecanicamente. Já nessa etapa é produzido resíduos, uma vez que a sobras dessa operação é disposta para descarte, conforme figuras 6 (a), (b), (c) e (d).

Figura 6 - Lotes de vidro separado para corte (a,b) e sobras do processo (c, d).



Fonte: próprio autor

Após confecção das peças nos tamanhos projetados, as chapas cortadas passam pelo processo de desbastamento (figuras 7a e 7b), processo que deixa o manuseio do vidro mais seguro, tirando o poder de corte das bordas das peças. Para esse processo a utilização de água é importante, uma vez que a temperatura do desbaste pode acarretar na trinca das peças.

Figura 7 - Processo de desbastamento do vidro



Fonte: próprio autor

Assim é formado o resíduo de pó de vidro com água, que é captado por canaletas e encaminhado para uma baía de mistura, conforme figura 8. Nessa baía é adicionado um floculante responsável para aglutinar as partículas de pó de vidro e separa-las da água utilizada em todo o processo. A água utilizada é reaproveitada e o vidro é separado em sacos de 60 kg, em forma pastosa, onde posteriormente é lacrado e despejado em caçamba estacionária para descarte no aterro municipal de Porto Velho conforme figuras 8 (a), (b), (c), (d), (e) e (f).

Figura 8 – Calha de recolhimento das máquinas de desbastamento (a), (b) e (c), processo de adição de floculante a água com resíduo de vidro (d), acondicionamento de resíduo de vidro em sacos plásticos de 60 kg (e) e depósito de resíduo em caçamba estacionária (f).



Fonte: Próprio autor

3.2.2.2 Preparo do resíduo de vidro para moagem

O resíduo de vidro coletado foi retirado dos sacos de coleta e depositado em bandejas de alumínio (figuras 9a e 9b) para passar por processo de secagem em estufa por 72 horas a uma temperatura média de 105 °C (figura 9c). Após esse período o resíduo de vidro foi destorroado de forma manual com auxílio de uma marreta (figura 9d) e passado pela peneira de abertura de 600 μm (peneira #30), para separar o material a ser moído no moinho de bolas do Laboratório de Materiais da Fundação Universidade Federal de Rondônia.

Figura 9 - (a)(b) (c) (d) Preparação do resíduo de vidro para secagem em estufa.



Fonte: Próprio Autor

Após a separação do material na peneira #30, passou-se para a etapa de moagem, utilizando o moinho de bola, figura 10, com a utilização de bolas de porcelana de duas dimensões, 15 e 30 mm, a uma rotação operacional de aproximadamente 150 rpm.

Figura 10 - Moagem do resíduo de vidro no moinho de bolas.



Fonte: Próprio Autor

O material foi disposto no moinho de modo a cobrir as bolas de porcelana. Durante o processo de moagem, os resíduos de vidro, juntamente com as esferas de porcelana, ocuparam metade do jarro do moinho. Foram usados para cada moagem 2.500 g de resíduo de vidro, conforme figura 11 (a) e (b).

Figura 11 - (a) disposição do resíduo de vidro no jarro e (b) operação de moagem



Fonte: Próprio Autor

O processo de moagem utilizando o moinho de bolas seguiu os passos da metodologia de Sousa Neto (2014), onde foram selecionadas dois tempos de moagem, 16 e 32 horas, uma vez que foram os dois tempos com maior rendimento de diminuição dos tamanhos das partículas.

3.2.2.3 Granulometria à laser – resíduo moído de vidro

Os tamanhos das partículas finas de resíduo moído de vidro foram determinados pela técnica de difração à laser, técnica essa amplamente utilizada para determinação do tamanho de partículas que variam de milímetros à centenas de nanômetros. Segundo Cordeiro (2006), é importante se conhecer o tamanho das partículas dos materiais a serem empregados em matrizes cimentícias, mesmo depois de suas moagens, uma vez que esse conhecimento pode ajudar no controle e a otimização na utilização de adições minerais.

A análise granulométrica à laser foi realizada utilizando o analisador de partículas à laser Malvern Mastersizer pelo laboratório de análise minerais – LAMIN da CPRM – Serviço Geológico do Brasil na cidade de Manaus (figura 12).

Figura 12 – Analisador de partículas à laser LAMIN, CPRM Manaus.



Fonte: próprio autor

3.2.2.4 Composição química do resíduo moído de vidro

Determinar a composição química do resíduo moído de vidro se faz necessário uma vez que os conhecimentos de seus principais componentes podem sugerir de há alguma impureza no material, que possa atrapalhar na sua utilização como substituto parcial do cimento nas argamassas, bem como analisar os elementos que possam influenciar no processo de hidratação do cimento.

A análise da composição química do resíduo moído de vidro foi realizada no laboratório de Ensaio Físico-Químicos/FT/UFAM através da fluorescência de raio X (FRX) utilizando Espectrômetro PANalytical, modelo EPSILON 3 XL (figura 13).

Figura 13 – Espectrômetro de raio X por energia dispersiva, modelo EPSILON 3XL



Fonte: Próprio autor

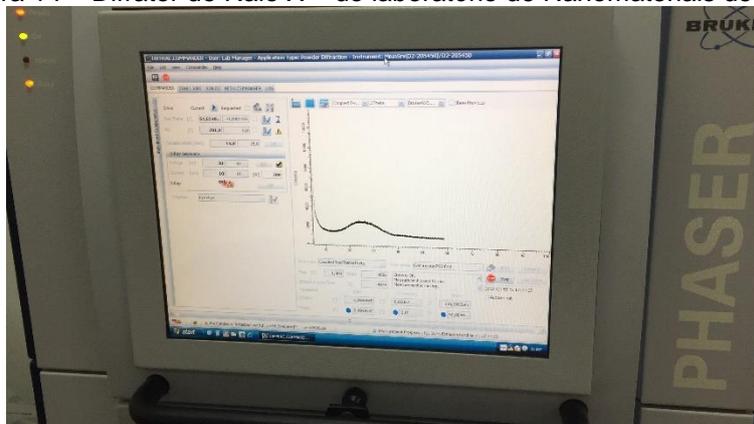
3.2.2.5 Análise de difração de raio X – DRX – resíduo de vidro

O ensaio de difração de raio X – DRX é utilizado para verificar as fases cristalinas de um material, podendo identificar alguns elementos químicos presentes no material.

A análise da difração de raio X foi realizada pelo laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais – LSCN do Instituto Federal do Amazonas –

IFAM, utilizando o difrator de raio X D2 PHASER, da marca Bruker, conforme figura 14.

Figura 14 – Difrator de Raio X – do laboratório de Nanomateriais do IFAM



Fonte: Próprio autor.

3.2.2.6 Ensaio de determinação de atividade pozolânica

Alguns aditivos minerais utilizados em compósitos cimentícios podem promover mudanças na matriz devido às características pozolânicas desses aditivos. Portanto, para analisar-se um material que possa ter características pozolânicas alguns ensaios são necessários, sendo o mais comumente empregado o índice de atividade pozolânica – IAP, realizado com cimento.

O ensaio preconizado pela NBR 5772:2014 consiste na confecção de dois traços de argamassa de 1:3 (cimento/areia). Os corpos de prova de 5 x 10 cm, foram moldados em argamassadeira de capacidade com capacidade de 5 litros, mantidos em ambiente úmido nas primeiras 24 horas. Após desmoldagem, os corpos de prova foram envoltos por papel filme de PVC, posteriormente acondicionados em recipiente hermético e levado a estufa por 27 dias e mantidos a uma temperatura de 38 ± 2 °C. Os procedimentos do ensaio são descritos na sequência das figuras 15 (a), (b), (c) e (d).

Figura 15 - (a) e (b) corpos de prova para realização de ensaio de atividade pozolânica, (c) corpos de prova selados com papel filme e (d) recipiente hermético com os corpos de prova colocados em estufa.



Fonte: Próprio Autor

Os rompimentos dos corpos de prova por compressão foram realizados pela máquina universal de ensaios modelo EMIC 23-100, da marca INSTRON/EMIC (Laboratório de Estruturas – DECIV/UNIR). Com os resultados de compressão, o índice de atividade pozolânica foi obtido pela equação 10:

$$IAP = \frac{f_{cp}}{f_c} \cdot 100 (\%) \quad (10)$$

Onde,

IAP: índice de atividade pozolânica com cimento Portland;

f_{cp} : resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados com cimento Portland e material pozolânico;

f_c : resistência média, aos 28 dias, dos corpos de prova moldados apenas com cimento Portland.

3.2.2.7 Ensaio de determinação de reação álcali agregado

O ensaio para determinação da reação álcali agregado utilizado na pesquisa foi o preconizado pela NBR 15.577-4/2008. O ensaio é indicado para a análise de reatividade de agregados reativos frente a uma solução de hidróxido de sódio, na qual por análise de expansão de barras de argamassa verifica-se a reatividade ou não do material.

O processo do ensaio consiste na confecção de traço padrão da NBR 15577-4/2008 de 1:2,25:0,47 (cimento:areia:água) com as quantidades em massa de 440 g de cimento, 990 g de areia. O agregado miúdo (areia) deve seguir a distribuição granulométrica conforme prescrito pela norma e o cimento utilizado para o procedimento de ensaio foi o cimento CP V-ARI. A tabela 5 mostra a composição para realização do traço. A sequência das figuras 16 (a-d) indica a separação do material utilizado e a confecção das argamassas normatizadas.

Tabela 5 - Composição dos materiais para ensaio de reatividade álcali-agregado

Abertura nominal das peneiras (mm)		Massa (g)
Agregado	4,8-2,4	99,0
	2,4-1,2	247,5
	1,2-0,6	247,5
	0,6-0,3	247,5
	0,3-0,15	148,5
Cimento		440,0
Água destilada (a/c = 0,47)		206,8

Fonte: Adaptada da NBR 15577-4:2009

Figura 16 – Separação dos materiais para ensaio de RAA (a) e (b), confecção dos traços (c) e (d).



Fonte: Próprio Autor

Foram preparados para esse ensaio dois parâmetros para análise, o primeiro, foram tempos de moagem divididos em 16, 32, 48 e 72 horas, e o segundo foi o percentual de substituição de cimento por resíduo moído de vidro, nas faixas de 10%, 20%, 30% e 40%. Foi feito a interação entre os

tempos de moagem com todos os percentuais de substituição, onde resultou traços de argamassas divididos de 1 a 16, conforme exemplificado no quadro 4.

Quadro 4 – Esquema de interação dos traços das barras de argamassa para análise de reação álcali agregado.

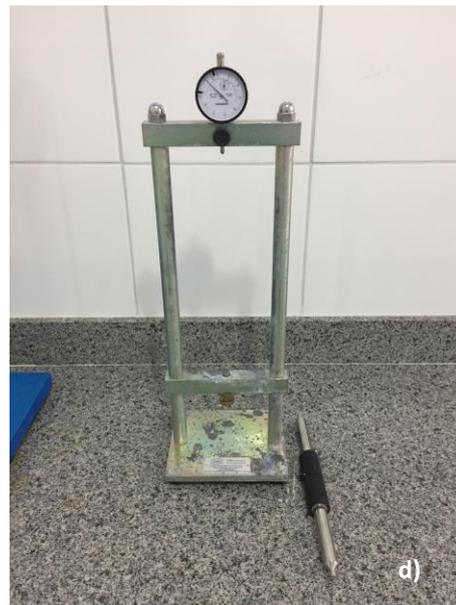
TRAÇO	1	2	3	4	5	6	7	8
T. Moagem (hrs)	16	32	48	72	16	32	48	72
% Substituição	10	10	10	10	20	20	20	20
TRAÇO	9	10	11	12	13	14	15	16
T. Moagem (hrs)	16	32	48	72	16	32	48	72
% Substituição	30	30	30	30	40	40	40	40

Fonte: Próprio autor

O procedimento do ensaio consiste na confecção de três barras de argamassa com medidas de 25x25x285 mm, posteriormente curadas em ambiente úmido nas primeiras 24 horas de ensaio. Logo após esse período, as barras foram desformadas e tiveram a primeira leitura de caráter orientativo aferida; em seguida foram colocadas em recipiente com água destilada a 23 °C e introduzidas em estufa ventilada, sendo aquecidas até a temperatura de 80°C. Transcorridas 24 horas, as barras foram novamente aferidas e introduzidas em recipiente com solução de hidróxido de sódio a 80°C. As leituras de 16 e 30 dias são relatadas pela norma como obrigatórias, sendo orientadas ainda pelo menos mais três leituras intermediárias (figura 17a, b, c, d).

Figura 17 – (a) confecção de barras de argamassa, (b) barras em ambiente úmido, (c) barras em solução de hidróxido de sódio dentro da estufa ventilada e (d) equipamento de medição de expansão





Fonte: Próprio Autor

3.2.3 Caracterização do cimento Portland CP II-Z-32

Foram realizados ensaios de caracterização também no cimento utilizado nesse trabalho. Sabe-se que o cimento é um material industrializado e com alto controle tecnológico, mas os laudos fornecidos pelas fabricantes de cimento nem sempre mostram todos os elementos disponíveis nos seus produtos. Dessa forma foram realizados alguns ensaios para não haver dúvidas quanto ao cimento utilizado.

3.2.3.1 Granulometria à laser do cimento

Para a verificação do tamanho das partículas do cimento foi realizado ensaio de granulometria à laser conforme feito também para o vidro, como explicado anteriormente no item 3.2.2.3. Sendo utilizado álcool etílico p.a como dispersante, uma vez que a utilização de água como dispersante pode interferir na análise por conta do processo de hidratação do cimento.

3.2.3.2 Termogravimetria do cimento

Para analisar possíveis mudanças físico-químicas do cimento utilizado, foi realizado ensaio de Termogravimetria, tal análise é e usada para determinar

as reações de decomposição de substâncias que ocorre com a variação da massa a partir do aumento gradativo da temperatura.

O ensaio foi realizado pelo laboratório de Ensaio Físico-Químicos/FT/UFAM, utilizando o equipamento SDT Q600, marca TA Instrument (figura 18). A amostra de cimento foi aferida a aproximadamente 12 mg, a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min até a temperatura final de 950 °C, com fluxo de gás N 5.0 de 30 ml/min. O cadinho utilizado nos testes foi o de alumina de 90 microlitros sem tampa.

Figura 18 - Equipamento termogravimétrico do laboratório de ensaios físico-químicos/FT/UFAM.



Fonte: Próprio autor

3.2.3.3 Composição química do cimento

As análises da composição química do cimento seguiram a mesma metodologia do item 3.2.2.4, realizados no laboratório de análises físico-químicas da UFAM. A análise química, como já mencionado anteriormente, tem a importância acerca dos compostos que formam o material em análise. Para o cimento, esse conhecimento dos compostos químicos é ainda maior, uma vez que ao delimitar seus componentes químicos é possível analisar os compostos que influenciam diretamente no processo de hidratação e ganho de resistência das matrizes cimentícias.

3.2.3.4 Difração de raios X – DRX Cimento

O ensaio de difração de raios X para análise do cimento foi realizado e seguiu os procedimentos já mencionados no item 3.2.2.5. Para o cimento esse ensaio é importante para verificar os picos cristalinos dos compostos que estão presentes no material. A difração de raios X permite uma análise qualitativa dos compostos cristalinos presentes no cimento.

3.2.4 Produção e caracterização das argamassas

3.2.4.1 Dosagem das argamassas

Foram confeccionadas argamassas com traço de referência 1:2:0,40 (cimento:areia:a/c), para posterior ensaio de resistência a compressão para 3, 7, 21 e 28 dias. Os traços modificados consistiam na substituição do cimento Portland pelo resíduo de vidro moído, nas proporções de substituição de 10%, 15% e 20%. Os traços definidos com a nomenclatura “A” são os que tiveram a substituição parcial do cimento por vidro moído por 16 horas, enquanto os traços com nomenclatura “B” foram os que tiveram introduzidos o resíduo de vidro moído por 32 horas. As numerações 1, 2 e 3 referem-se aos percentuais de substituição de 10%, 15% e 20% respectivamente. O quadro 5 esquematiza melhor a divisão dos traços.

Quadro 5 – Nomenclaturas dos traços do trabalho e suas respectivas características.

Traço	% de substituição	Tempo de Moagem (Horas)
TC - Controle	0	0
T1A	10	16
T1B	10	32
T2A	15	16
T2B	15	32
T3A	20	16
T3B	20	32

Fonte: Próprio autor

Os traços tiveram a relação água/cimento (a/c) fixados na relação 0,40, além de conter 0,10% de superplastificante Glenium 51, a fim de manter a trabalhabilidade da argamassa. Os traços com substituição parcial do cimento pelo resíduo moído de vidro tiveram um aumento na dosagem do superplastificante, onde para os percentuais de 10%, 15% e 20% de substituição foi adicionado 0,12%, 0,14% e 0,16% de superplastificante respectivamente. É fato que tanto o traço referência quanto os traços com substituição não tiveram o mesmo fator a/c uma vez que não foram feitas as correções com o a parte líquida do (em torno de 70%) superplastificante. Dessa forma a tabela 6 apresenta os valores corrigidos do fator a/c para cada traço.

Tabela 6 – Traços com as quantidades de material em kg e fator a/c corrigido

Traço/ Materiais	TC	T1A	T1B	T2A	T2B	T3A	T3B
	Quant. Material (kg)						
Cimento	3,22	2,898	2,898	2,737	2,737	2,576	2,576
Vidro	0	0,322	0,322	0,483	0,483	0,644	0,644
Areia	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44	6,44
Água	1,288	1,288	1,288	1,288	1,288	1,288	1,288
Plastificante	0,00322	0,03864	0,03864	0,004508	0,004508	0,005152	0,005152
Fator água/ cimento	0,40070	0,40084	0,40084	0,40098	0,40098	0,40112	0,40112

Fonte: Próprio autor

As argamassas foram produzidas em betoneira com capacidade de 120 litros, marca Betomil, do Laboratório de Materiais de Construção Civil do DECIV/UNIR. As etapas de execução na confecção dos traços foram as seguintes: primeiro a água de amassamento foi misturada com o superplastificante, depois foi adicionado o cimento e após 1 min de mistura foi adicionado o agregado miúdo e misturados durante 7 min na betoneira, para que o superplastificante pudesse agir na mistura, conforme figura 19 (a) e (b). Efetuou-se para todos os traços o ensaio de abatimento do tronco de cone na mesa de consistência conforme anexo B da norma NBR 7215/1996, conforme figuras 19 (c) e (d).

Figura 19 - (a) betoneira utilizada na confecção das argamassas, (b) execução da mistura das argamassas e (c) e (d) ensaio de espalhamento das argamassas.



Fonte: Próprio Autor

A moldagem dos corpos de prova de 5x10 cm foi realizada manualmente, com adensamento em três camadas, sendo cada uma com 30 golpes de soquete normatizado. Os corpos de prova ficaram em câmara úmida nas primeiras 24 horas, e após esse período foram desmoldados e submersos em tanque com água da rede adutora da UNIR por 28 dias (figuras 20a e 20b).

Figura 20 - (a) Moldagem dos corpos de prova e (b) cura submersa



Fonte: Próprio Autor

3.2.5 Ensaio mecânico

Os ensaios de resistência à compressão das argamassas confeccionadas foram executados na máquina universal Emic 23-100, marca INSTRON/EMIC, do Laboratório de Estruturas do DECIV/UNIR (figura 21a). A velocidade de carregamento usada foi de 0,45 MPa/s. Configurações segundo a NBR 5739/2007.

A regularização das superfícies superiores e inferiores dos corpos de prova das argamassas foi feita por meio de retificação, usando uma máquina de policortes (figura 21b) do Laboratório de Materiais do DECIV/UNIR.

Figura 21 - (a) Máquina Universal de ensaios mecânicos e (b) máquina policorte para retificação das superfícies dos corpos de prova



Fonte: Próprio Autor

3.2.6 Análise estatística dos dados

O modelo estatístico utilizado para análise da resistência mecânica à compressão foi o inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 3 (dois tempos de moagem do pó de vidro e três percentuais de substituição de cimento por pó de vidro) com um tratamento adicional (tratamento controle), ambos com cinco repetições. A análise de variância (ANOVA) foi realizada

utilizando o software Assistat 7.7 (SILVA, 2016). As médias foram contrastadas pelo Teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e análises dos materiais empregados, bem como das argamassas confeccionadas com esses materiais.

4.1 Caracterização dos materiais

São apresentados nos itens a seguir os resultados obtidos dos ensaios de caracterização dos materiais empregados nessa pesquisa para confecção de argamassa de cimento Portland.

4.1.1 Agregado miúdo

Os resultados obtidos das caracterizações físicas do agregado miúdo estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo

Ensaio	Unidade	Resultados	Limites normatizados
Massa específica	kg/dm ³	2,674	-
Massa unitária	kg/dm ³	1,447	-
Teor de material pulverulento	%	4,700	3,00 a 5,00
Material orgânico	ppm	300	300
Módulo de finura	-	2,687	-
Diâmetro máximo	mm	2,400	-
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	%	1,50	1,50

Fonte: Próprio Autor

Os valores obtidos para as massas específicas e massa unitária foram de 2,674 e 1,447 kg/dm³, esses valores estão dentro dos valores encontrados

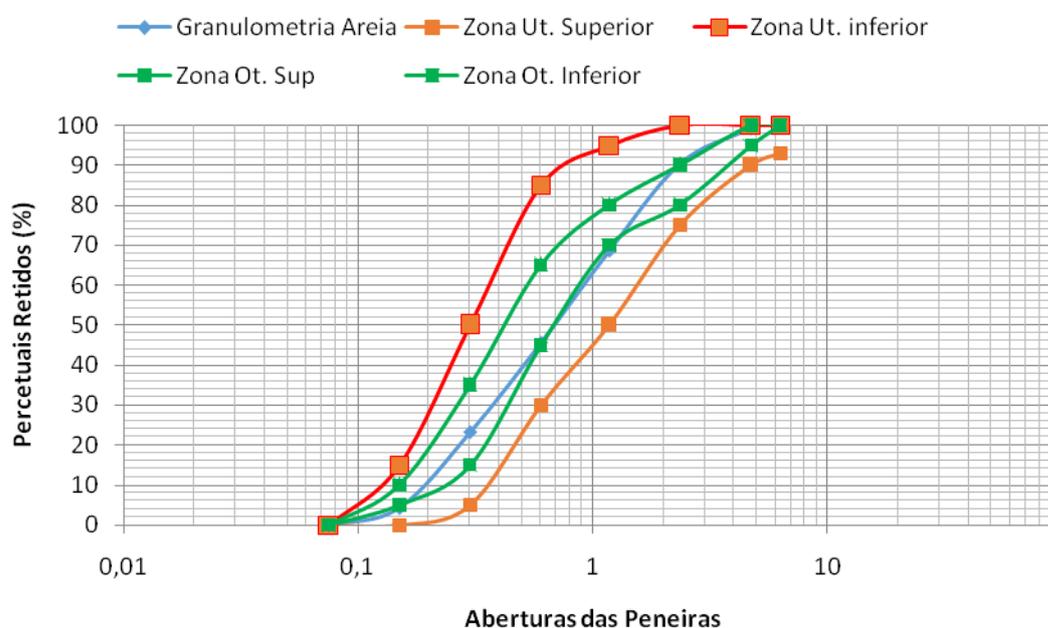
na bibliografia dessa pesquisa, podendo assim considerar valores aceitáveis para as características da areia.

Quanto ao módulo de finura, a areia analisada encontra-se na zona de utilização considerada ótima, uma vez que a NBR 7211/2005, estabelece que tal nomenclatura pode ser usada para areias que apresentam variação entre 2,20 a 2,90 de módulo de finura.

O teor de materiais pulverulentos obtido foi de 4,70 %, conforme tabela 6, limite este bem próximo da norma NBR NM 46/2003, que varia de 3 a 5 %. Quanto a teor de argila e materiais friáveis, o valor obtido foi inferior ao estabelecido pela NBR 7218/2010.

A distribuição granulométrica do agregado miúdo foi determinada de acordo com a NBR NM 248/2003. Segundo limites estabelecidos pela NBR 7211/2005, em sua tabela 2 (limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo), o agregado miúdo utilizado nessa pesquisa está dentro dos valores aceitáveis para utilização.

Figura 22 - Curva granulométrica do agregado miúdo



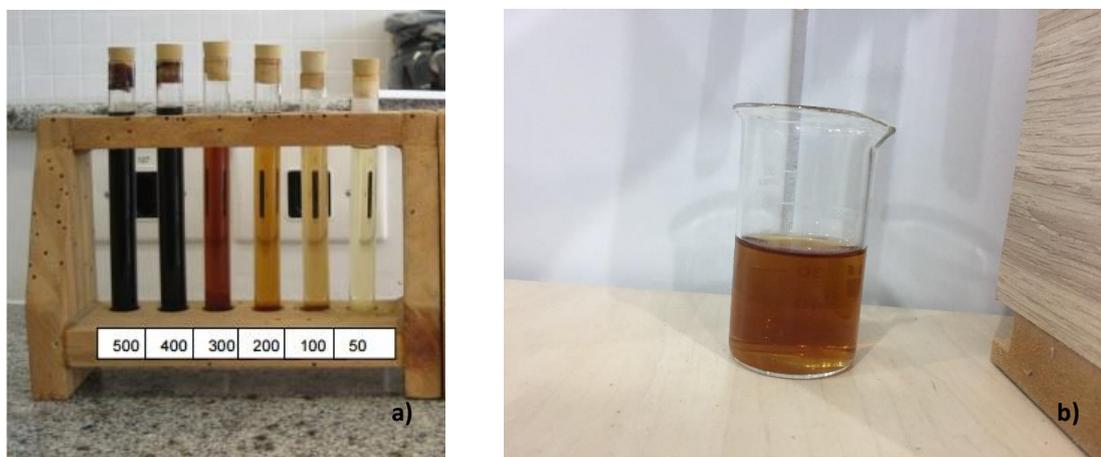
Fonte: próprio autor

A curva granulométrica da figura 22 mostra uma distribuição bem graduada, não apresentando descontinuidade entre as aberturas das peneiras.

Essa distribuição possibilita uma quantidade maior de material nas argamassas, com mistura mais densa e maior durabilidade e resistência. Tal distribuição de agregado miúdo se encontra na sua maior parte dentro da faixa de zona ótima.

Para a determinação dos teores de impurezas orgânicas, normatizado pela NBR NM 49/2001, pelo ensaio colorimétrico, pode-se observar que a areia utilizada como agregado miúdo obteve uma coloração bem próxima do limite (figuras 23a e 23b) estabelecido pela norma, que é 300 ppm, indicando que a mesma está no limite para utilização. Dessa forma a areia utilizada nessa pesquisa atendeu os requisitos estabelecidos por norma.

Figura 23 - (a) Tabela colorimétrica e (b) ensaio da areia utilizada na pesquisa.



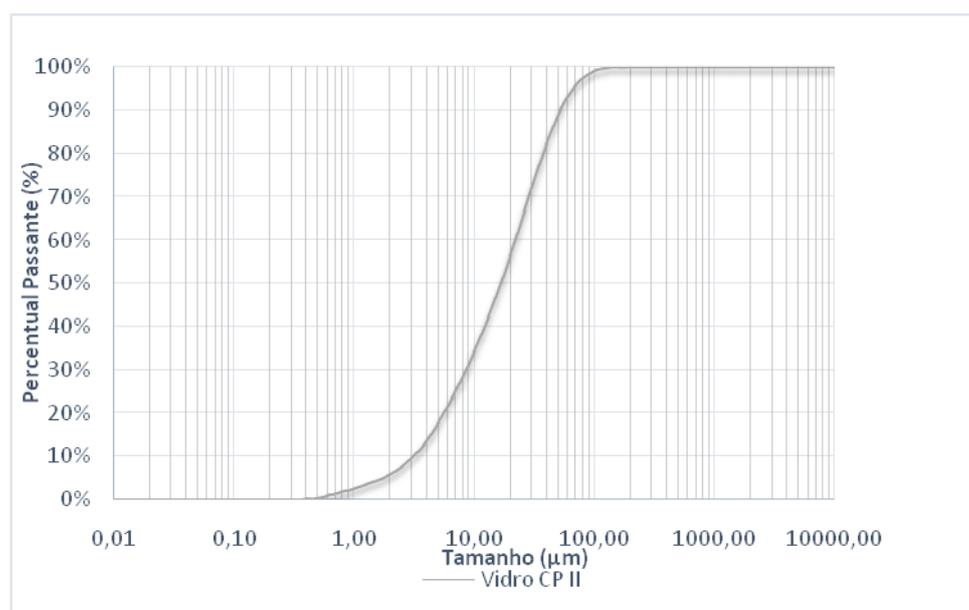
Fonte: Próprio autor, sendo a) adaptado de MEIER, D (2011).

4.1.2 Cimento Portland CII – Z

4.1.2.1 Granulometria à laser

Foi realizada análise granulometria do cimento, afim de se comparar com os dados obtidos com a o apresentado pela fabricante, e ver também a interação futura com o resíduo de vidro. A figura 24 apresenta a distribuição granulometria do cimento CP II – Z – 32.

Figura 24 – Curva granulometria do cimento CP II – Z - 32



Fonte: Próprio autor

A curva granulometria do cimento apresentou tamanho médio das partículas na faixa de 52,11 μm . A distribuição ainda demonstra que a amostra possui o D_{90} , D_{50} e D_{10} das partículas com 52,11 μm , 16,67 μm e 3,13 μm respectivamente.

4.1.2.2 Composição química, Termogravimetria e Difração de raios X

A tabela 8 apresenta a composição química do cimento obtido pelo ensaio de fluorescência de raios X.

Tabela 8 – Composição química do Cimento CII – Z - 32

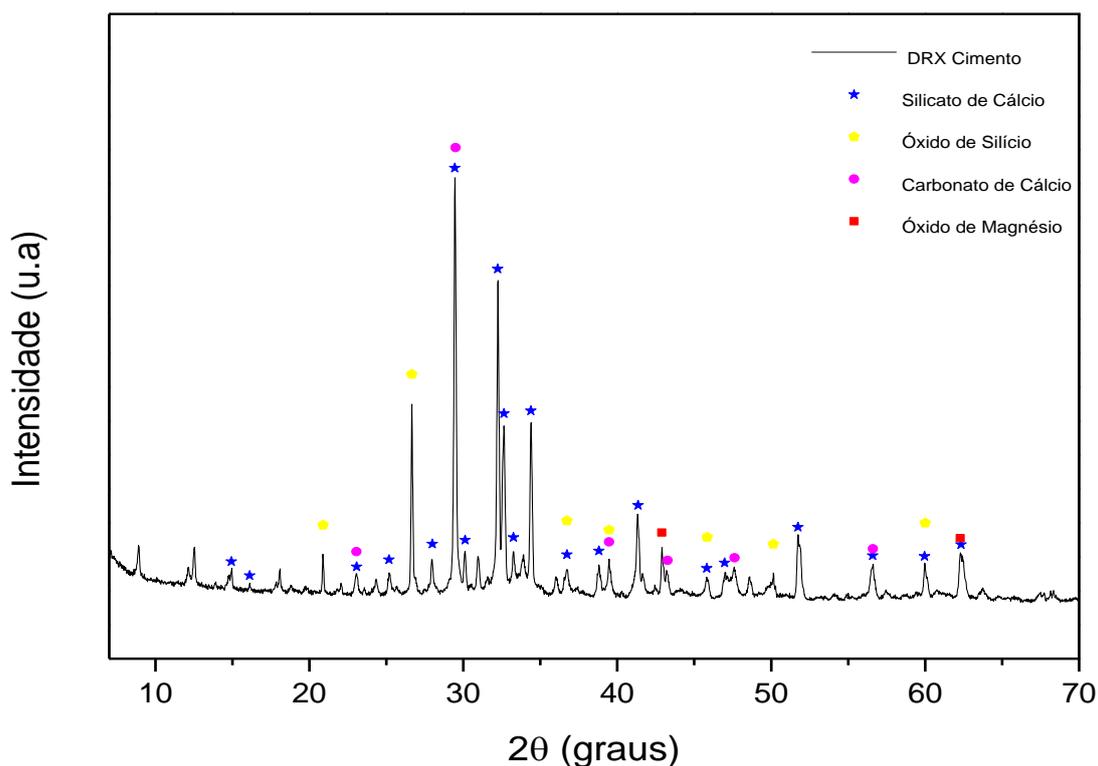
COMPOSTO QUÍMICO	PERCENTUAL (%)
CaO	57,61%
SiO ₂	22,94%
Al ₂ O ₃	5,60%
MgO	3,99%
Fe ₂ O ₃	3,99%
SO ₃	3,17%
K ₂ O	1,68%
P ₂ O ₅	0,37%

Fonte: Próprio autor.

A composição química do cimento não apresentou diferenças significativas nas porcentagens dos compostos constante no relatório da fabricante do cimento. O percentual ainda de 22,94% de SiO_2 , é superior as faixas de 6% a 14% estabelecidas pela NBR 11578/1991 para materiais pozolânicos. Assim o cimento respeita as exigências de um cimento pozolânico.

A figura 25 apresenta os resultados do ensaio de DRX realizado no cimento. É possível identificar, pelo gráfico do ensaio, os principais compostos cristalinos que compõem o cimento e observar que os picos de maiores intensidades apresentam os compostos mais significantes para o cimento, como o silicato de cálcio, óxido de silício e o carbonato de cálcio. Ainda é notado a natureza cristalina do cimento utilizado na pesquisa.

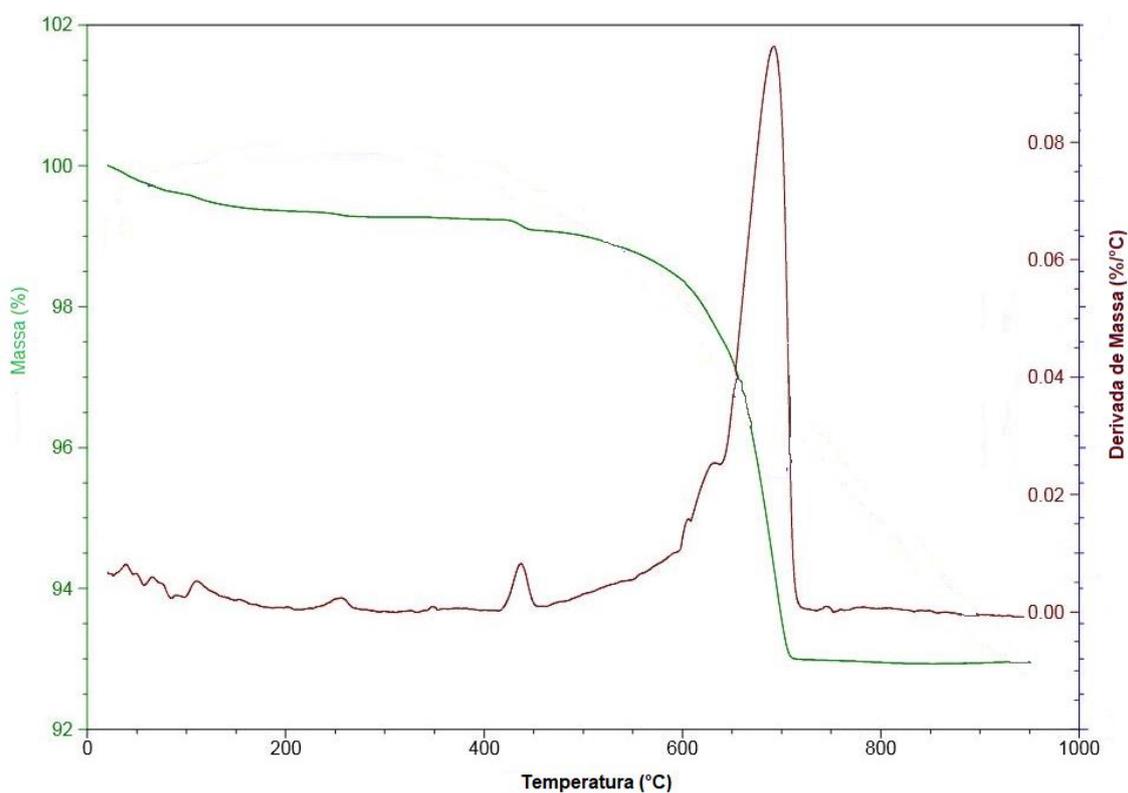
Figura 25 – Difratoograma do cimento CII – Z - 32



Na figura 26 é mostrado o resultado na análise de Termogravimetria do cimento CII – Z. A curva de perda de massa (TG) é indicada pela linha azul. E a curva derivada da perda de massa (DTG), é indicada na cor vermelha. Na

DTG, o primeiro pico que é observado no gráfico, que ocorre nas temperaturas inferiores a 200 °C referem-se à água intersticial que o cimento apresentou, bem provável que devido ao contato com o ar atmosférico no manuseio da amostra, mas não apresentando algum dano para a utilização do cimento para os serviços a que se destina. O segundo pico, entre as temperaturas de 400 °C e 500 °C indica a decomposição de uma pequena parte da portlandita (CH) e o terceiro pico, que ocorre entre 600 °C e 800 °C, demonstra a decomposição do carbonato de cálcio, onde apresenta-se a maior perda de massa da amostra de cimento. A massa calcinada ao final do ensaio foi de aproximadamente 5%, valor similar ao especificado pelo fabricante do cimento que foi de 5,69% de perda o fogo.

Figura 26 – Curva DTG do cimento CII – Z-32.



Fonte: Próprio Autor

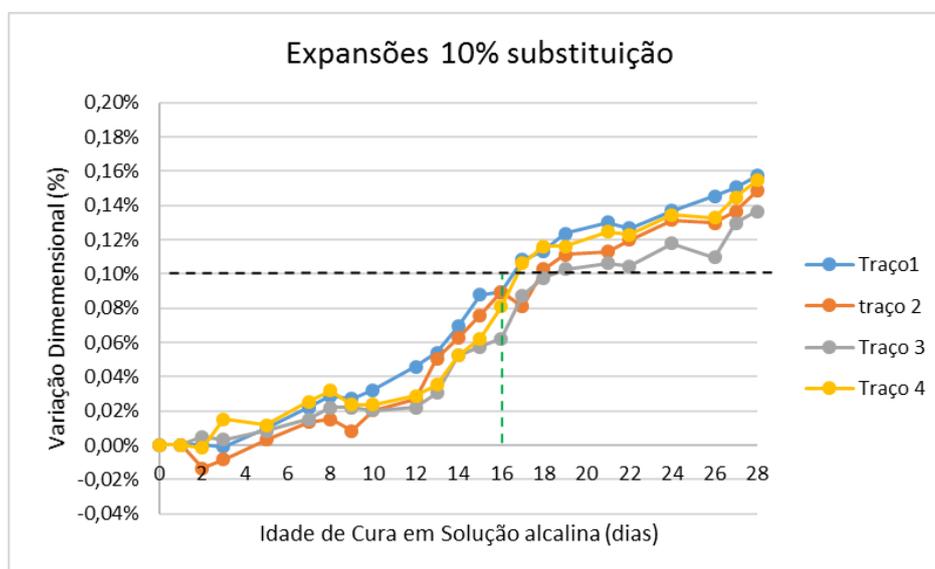
4.1.3 Resíduo Moído de Vidro

4.1.3.1 Reação Álcali Agregado

Conforme o procedimento descrito no capítulo 3, de acordo com a norma NBR 15577-4/2008, foram obtidos os resultados para os quais são apresentados nas figuras 27 a 30.

Os traços de 1 a 4 são os que tiveram a substituição de 10% do cimento por resíduo moído de vidro, sendo o resíduo empregado para cada traço obtido com tempo de moagem entre 16, 32, 48 e 72 horas respectivamente. Pode-se observar no gráfico da figura 27 que os 4 traços chegam ao 16º dia de análise no limite especificado pela norma, e ainda expandindo com o passar dos dias. Observa-se também, quanto aos tempos de moagem analisados, que as variações de expansão do traço 1 ao 4 não se diferem entre si, pois as linhas de cada traço concentram-se bem próximas umas das outras, chegando aos 28 dias de análise com expansões de 0,14% a 0,16%.

Figura 27 - Gráfico de expansão traços 1 a 4 – substituição de 10% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.

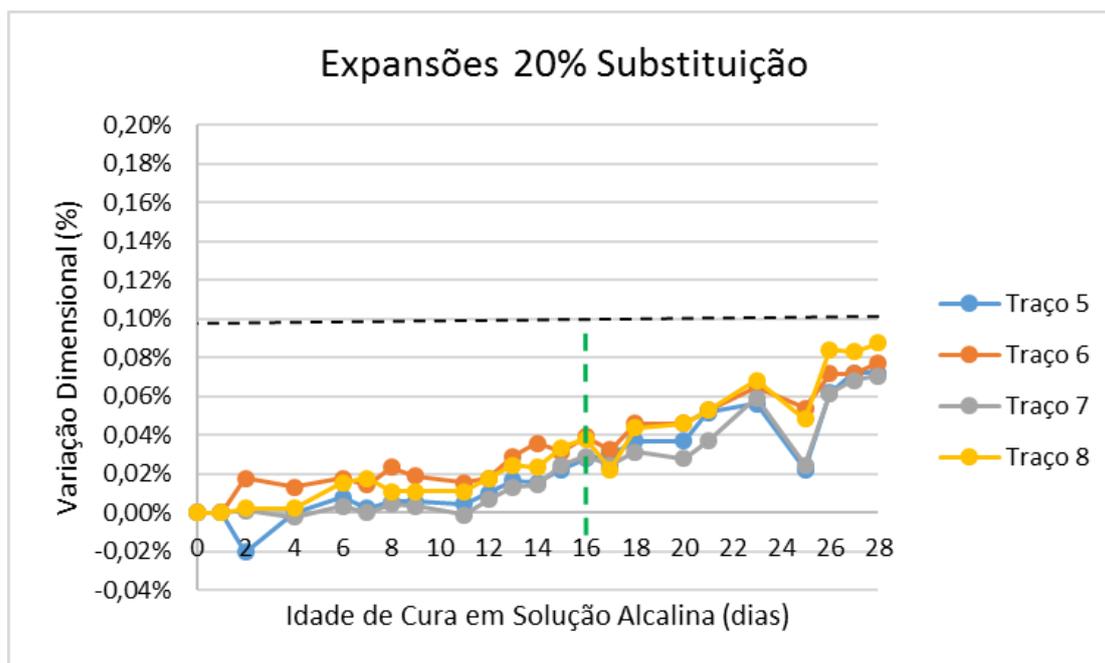


Fonte: Próprio Autor.

No gráfico da figura 28 é mostrado o aumento do percentual de substituição de cimento, para 20% de vidro onde já se observa que as expansões foram reduzidas.

Aos 16 dias as expansões das barras de argamassa variaram entre 0,02% e 0,04%. Aos 28 dias os traços tiveram aumento de expansão, mas não chegaram aos 0,10%, situando-se entre 0,07% e 0,09%, como mostrado no gráfico, assim o limite estabelecido para os 16 dias de análise pela norma não foi atingido em nenhum período de análise.

Figura 28 - Gráfico de expansão traços 5 a 8 – substituição de 20% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.

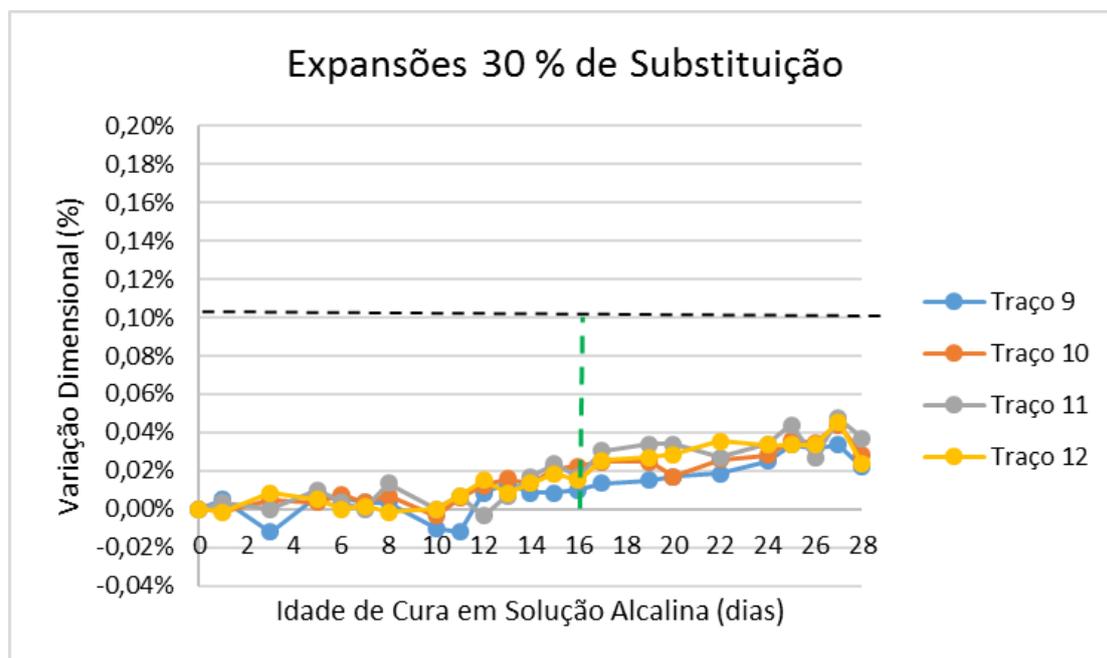


Fonte: Próprio Autor.

Deve-se salientar que os traços 5, 6, 7 e 8, seguiram a mesma sequência para os tempos de moagem nos quais os resíduos foram submetidos para os traços com 10% de substituição, ou seja, 16, 32, 48 e 72 respectivamente.

Substituindo 30% do cimento por resíduo moído de vidro, com os traços seguindo o mesmo padrão que os anteriores com relação ao tempo de moagem para o resíduo empregado, 16, 32, 48 e 72h (traço 9, 10, 11 e 12), conforme exposto na figura 29, as barras de argamassa apresentaram uma redução mais expressiva, variando no 16º dia entre 0,01% e 0,02% de aumento nas expansões, e tendo um pequeno aumento até o 28º dia, variando entre 0,02% e 0,04%.

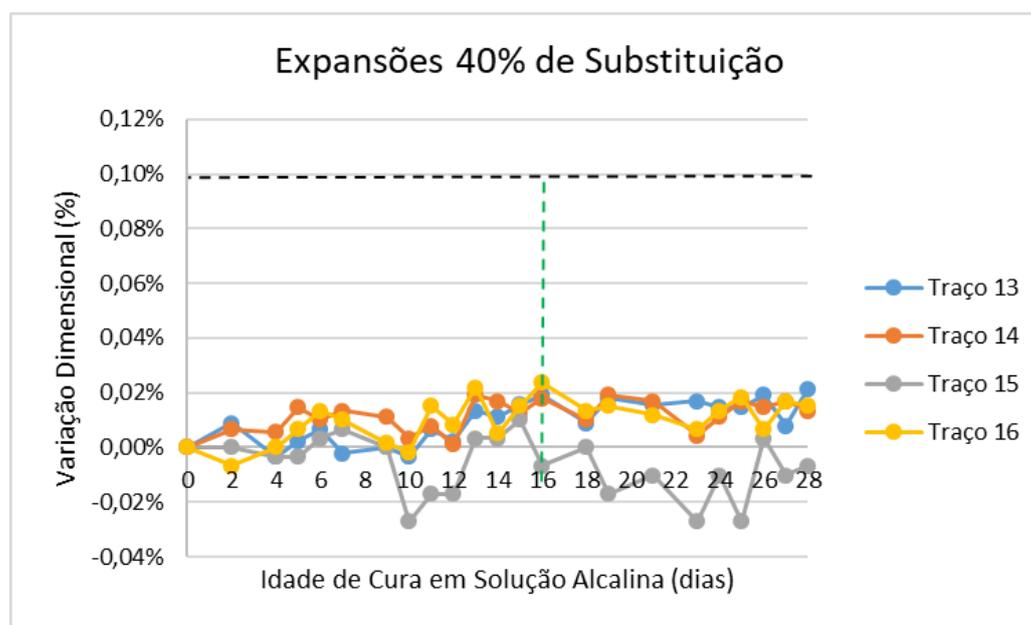
Figura 29 - Gráfico de expansão traços 9 a 12 – substituição de 30% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.



Fonte: Próprio Autor.

No último grupo de análise, os traços de 13 a 16, as barras com a substituição de 40% do cimento por resíduo moído de vidro, também variando os tempos de moagem entre 16, 32, 48 e 72 horas, conforme os outros traços, exibido no gráfico da figura 30, que demonstra as variações das expansões.

Figura 30 - Gráfico de expansão traços 9 a 12 – substituição de 40% de cimento por resíduo de moído de vidro, com moagens variando de 16 a 72 horas.



Fonte: Próprio Autor.

Com a substituição, pode-se observar que as expansões foram ainda menores, chegando aos 16 dias com variações de - 0,01% e 0,02%, ou seja, algumas barras apresentaram retrações, e mantiveram-se até os 28 dias de análise sem nenhuma variação significativa de expansões, cujos valores situaram-se entre -0,01 e 0,02%.

Ao analisar os gráficos de expansividade da reação álcali agregado apresentado anteriormente é possível observar que o aumento do percentual de vidro em substituição ao cimento nas barras de argamassa gerou uma redução nas expansões das barras de argamassa. Tal fato pode ser explicado pela redução de álcalis presente na mistura, uma vez que a diminuição do cimento reduz conseqüentemente a quantidade de álcalis na mistura, como pode-se observar no último grupo de análise, onde algumas barras apresentaram até retração.

Outro fato a ser avaliado é a influência do resíduo moído de vidro introduzido na mistura, como um material rico em sílica e amorfo, com grande superfície específica, por esta finamente moído, o vidro passa a agir como material pozolânico na mistura, onde pode também reduzir as expansões das barras de argamassa.

Ainda é possível avaliar que os tempos de moagem do resíduo de vidro, que variaram de 16 a 72 horas não demonstraram ser fator de redução ou aumento das expansões devido a reação álcali agregado. Assim o tempo de moagem de 16 horas com o percentual de 10% de substituição se mostra já eficaz para a redução a padrões da norma NBR 15.577-4/2008.

Essa redução da reação álcali agregado devido ao aumento do percentual de substituição de cimento é comprovada por outros autores, que em suas pesquisas analisaram o aumento do percentual de vidro moído na incorporação da argamassa, conforme quadro 6.

Quadro 6 - Relação de autores que justificam a redução da expansão da reação álcali agregado com o aumento do resíduo moído de vidro.

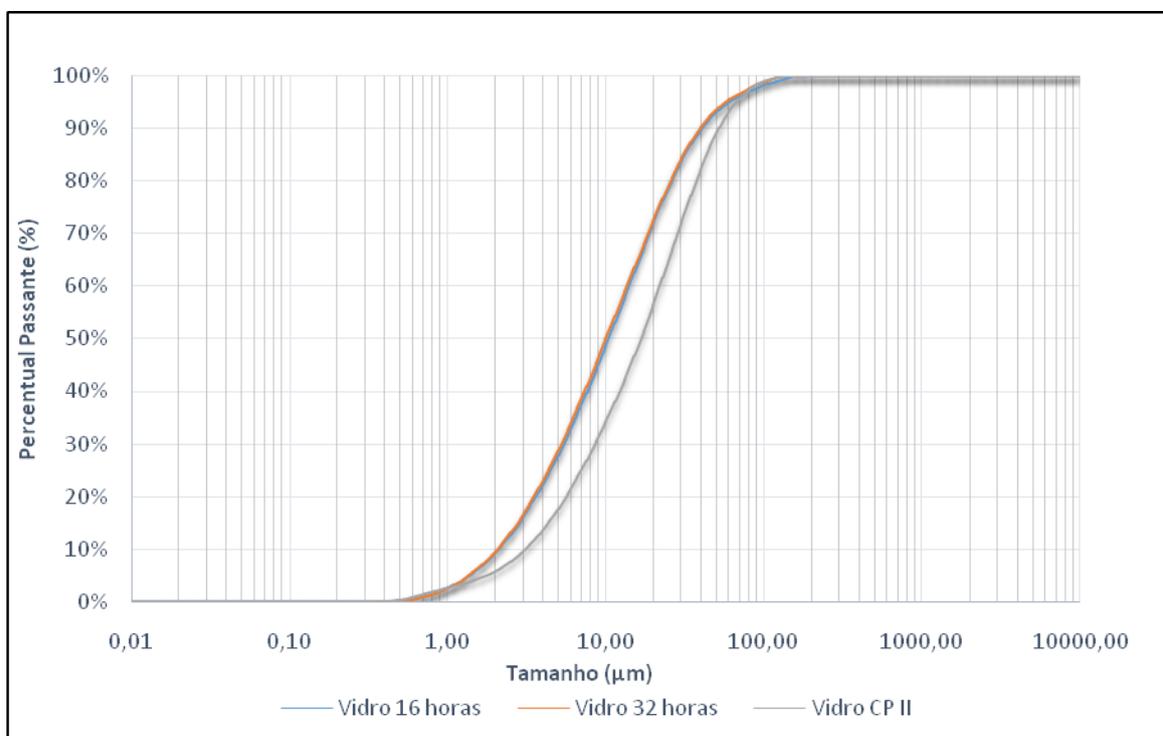
Autores	Relação Tamanho das Partículas e Reação Álcali Agregado
Shayan e Xu (2006)	Substituiu o cimento por vidro entre 10 e 30%, reduzindo as expansões menores que a norma.
Matos e Sousa-Coutinho (2012)	Usaram vidro moído nas faixas de 10 e 20% em substituição do cimento onde o aumento do vidro de 10 para 20%, reduziu a expansão abaixo do limite de norma.
Afshinnia e Rangaraju (2015)	Usaram vidro moído em substituição de 10 a 30% do cimento, contudo, apenas as barras contendo 20 e 30% foi capaz de reduzir aos 14 dias as expansões aos padrões da norma.

Fonte: Próprio Autor.

4.1.3.2 Granulometria à laser

Com os resultados obtidos a partir do ensaio de reação álcali agregado, foram realizados posteriormente a análise granulométrica do resíduo moído de vidro, nos tempos de 16 e 32 horas. A figura 31 mostra a distribuição granulometria dos dois tempos de moagem, bem como a comparação dos tamanhos das partículas com o cimento CP - II.

Figura 31 – Granulometria resíduo moído de vidro 16 e 32 horas e cimento CP II



Fonte: Próprio autor

Como já apresentado a tendência no ensaio da reação álcali agregado, os tempos de moagem não apresentaram diferenças quanto a distribuição granulométrica. O ensaio da granulometria vem a comprovar que o tempo de moagem de 16 para 32 horas não alterou o tamanho das partículas, observa-se no gráfico que a distribuição granulometria dos dois resíduos estão muito próximas, quase não sendo possível diferenciar uma da outra. Outro fato a se observar é que as duas amostras de vidro apresentam partículas menores que as partículas de cimento, tal situação pode contribuir para o melhor empacotamento da mistura, o que conseqüentemente atribui ao resíduo de vidro, em primeiro momento, um efeito fíler para mistura. Os tamanhos D(90), D(50) e D(10) são de 40,38 µm, 10,44 µm e 2,11 µm respectivamente.

4.1.3.3 Composição química e difração de raios X

Foi realizada análise de fluorescência do resíduo de vidro para análise da sua composição química, a tabela 9 apresenta o resultado do ensaio. Os resultados indicaram que o resíduo de vidro pode ser classificado como um vidro soda-cal, com a presença elementos químicos como o sódio e o cálcio. Ainda se nota a grande quantidade de sílica (74,07%) presente no resíduo de vidro, o que torna esse material potencialmente pozolânico.

Quanto a classificação do material pozolânico, segundo a NBR 12563/2014, o percentual dos componentes $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ devem ser de no mínimo de 70% para serem considerados pozolânico. O resíduo de vidro apresenta teor de 75,72%, assim considera-se esse resíduo com uma pozolana natural.

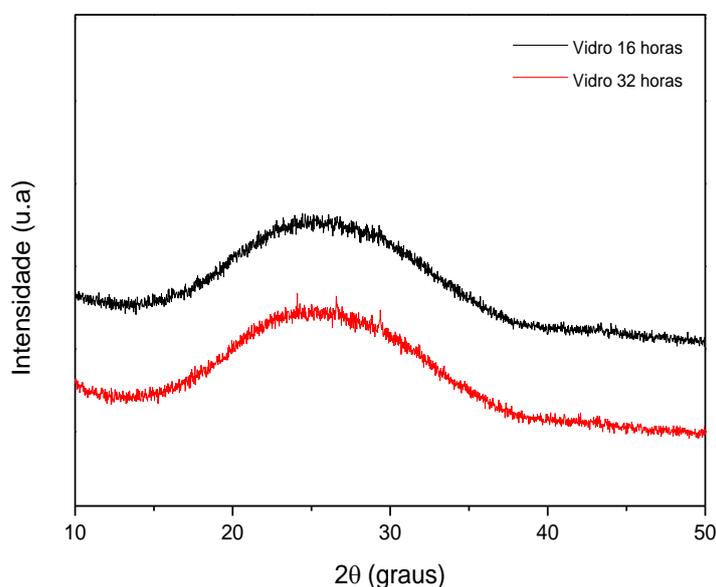
Tabela 9 – Composição química do resíduo de vidro

COMPOSTO QUÍMICO	PERCENTUAL (%)
SiO_2 – Dióxido de Silício	74,07%
CaO – Óxido de Cálcio	13,27%
Na_2O – Óxido de sódio	7,94%
MgO – Óxido de Magnésio	1,93%
Al_2O_3 – Óxido de Alumínio	0,99%
Fe_2O_3 – Óxido Ferroso	0,66%
P_2O_5 – Pentóxido de Fósforo	0,49%
K_2O – Óxido de Potássio	0,35%

Fonte: Próprio autor.

Afim de se atestar o estado amorfo do resíduo de vidro, foi realizado o ensaio de difração de raio X nas duas amostras de resíduo moído de vidro com os tempos de 16 e 32 horas de moagem. A figura 32 mostra a análise de DRX realizada nas amostras, nota-se as duas amostras apresentam uma estrutura cristalina amorfa, onde não é possível observar picos de difração, além de possuírem um halo largo, variando de 20° a 35°. O aumento do tempo de moagem, como esperado, não alterou a característica amorfa do resíduo de vidro, nota-se que as duas amostras apresentam curvas semelhantes.

Figura 32 – Difração de raio X realizado no resíduo de vidro – moagens de 16 e 32 horas.



Fonte: Próprio Autor.

4.1.3.4 Atividade pozolânica

A atividade pozolânica foi testada, além da composição química pela NBR 12563/2014, com base no ensaio da NBR 5752/1992, que estabelece que o material apresenta atividade pozolânica se o valor obtido pelo ensaio for superior a 75%. Os tempos de 16 e 32 horas foram testados com base nas informações dos ensaios anteriores. Obtiveram-se os resultados de 103,3% de IAP para o vidro moído a 16 horas e de 98,5% para o vidro moído por 32 horas.

Estes resultados corroboram os resultados de outros autores que utilizaram resíduo moído de vidro, todo com tamanho de partícula na mesma ordem ou inferiores as partículas de cimento, ou seja, vidros semelhantes ao utilizado nesse trabalho, podendo destacar os trabalhos de:

- a) Shao *et al.* (2000) que usando vidro de lâmpadas obtiveram aos 28 dias IAP de 96%;
- b) Shi *et al.* (2005) obtiveram nos estudos realizados um IAP aos 28 dias também de 116%;
- c) Agarwal (2006) obteve no índice de IAP de 92% analisando vidro moído abaixo de 45 μm .
- d) Lin *et al.* (2009) alcançaram no ensaio de IAP um valor de 89% usando vidro proveniente de vidros de LCD.
- e) Ismail e Al-Hashmi (2009) obtiveram 80% de IAP ao analisar o vidro proveniente da reciclagem de resíduos sólidos.
- f) Paiva *et al.* (2010) relataram que o IAP obtido na pesquisa foi de 104%. Khmiri *et al.* (2012) obtiveram resultados com IAP de 85%.
- g) Calmon *et al.* (2014) alcançou aos 28 dias um índice de atividade pozolânica de 86,36% usando vidro moído.

4.1.4 Caracterização das Argamassas com Resíduo Moído de Vidro

4.1.4.1 Resistência à Compressão

O quadro 7 mostra os resultados obtidos no ensaio de resistência a compressão nos períodos de 3, 7, 21 e 28 dias, com seus respectivos desvios padrão. Ainda são mostrados os resultados de espalhamento das argamassas. Observou-se que os resultados do traço controle (TC), em todos os períodos, obteve as melhores resistências em comparação a todos os traços com substituição parcial do cimento, conforme será mostrado posteriormente.

Ao analisar os resultados de espalhamento dos traços das argamassas, o traço controle é o traço que obteve o menor valor entre todos os traços. Tal

fato é notório uma vez que com o aumento do superplastificante dos traços com substituição parcial do cimento pelo resíduo moído de vidro, a relação água cimento foi alterada, tendo um pequeno acréscimo na relação, essa tendência só não é apresentada no traço T3B, que pode se explicar por não se deixar no ultimo traço o superplastificante agir no tempo determinado.

Quadro 7 - Resistência média a compressão e o abatimento das argamassas

Traços	Resistência a Compressão (Mpa) - Desvio Padrão (Mpa)				Espalhamento
	3 dias	7 dias	21 dias	28 dias	
Controle	19,84 ± 2,89	25,61 ± 3,32	27,19 ± 1,18	27,95 ± 4,35	200,5 ± 20 mm
T1A	16,56 ± 1,84	21,60 ± 0,90	21,87 ± 3,08	24,76 ± 2,97	241 mm
T1B	14,74 ± 1,70	21,21 ± 1,15	22,38 ± 4,13	21,76 ± 2,60	246,50 mm
T2A	14,43 ± 2,38	18,84 ± 1,23	22,41 ± 1,13	23,73 ± 1,92	241,50 mm
T2B	14,73 ± 0,94	17,25 ± 1,04	23,36 ± 0,78	21,16 ± 4,13	245 mm
T3A	12,01 ± 2,86	18,28 ± 1,31	22,84 ± 1,42	25,78 ± 2,54	259 mm
T3B	14,93 ± 2,40	16,33 ± 1,03	20,70 ± 3,34	22,95 ± 3,02	225,50 mm

Fonte: Próprio Autor.

Para melhor análise dos resultados de compressão, os valores obtidos em cada tempo de medição foram lançados no software Assistat, para avaliar os valores das resistências à compressão entre o traço controle e os traços com substituição de cimento. Ainda foram introduzidas na análise estatística os fatores de tempo de moagem e percentual de substituição para averiguação se esses fatores independentes e/ou interagidos apresentariam diferenças estatística para a análise dos valores obtidos no ensaio à compressão.

No quadro 8, é apresentada a primeira análise fatorial para os resultados à compressão aos 3 dias.

Quadro 8 - Análise fatorial da resistência à compressão (3 dias).

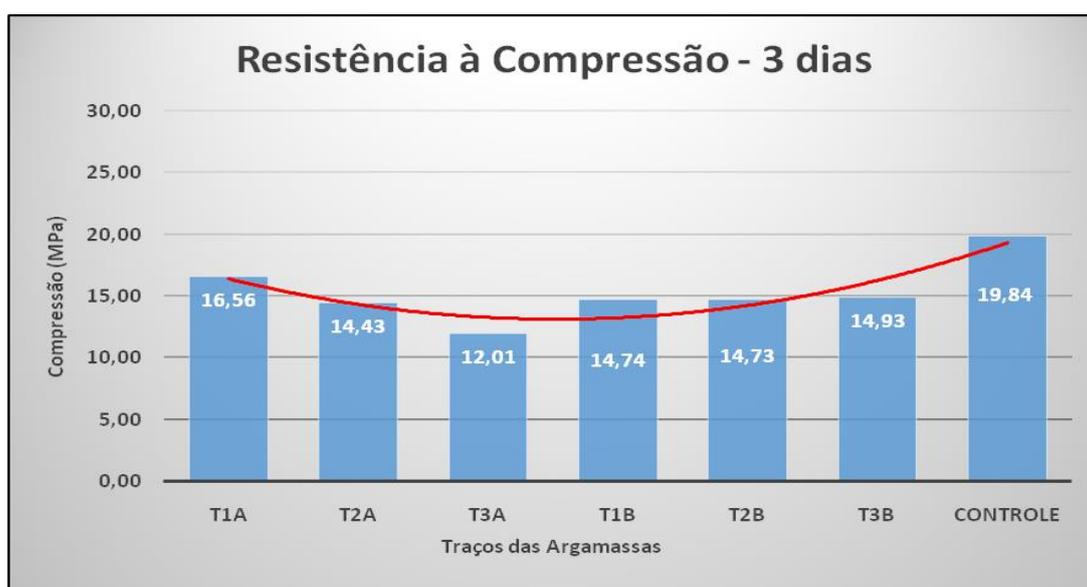
EXPERIMENTO FATORIAL - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (3 DIAS)					
FV	GL	SQ	QM	F	
Fator 1 (F1)	1	1,63333	1,63333	0,23580	ns
Fator 2 (F2)	2	23,80946	11,90473	2,37500	ns
Int. F1 x F2	2	28,23609	14,11804	2,81650	ns
Fat x Testemunho	1	119,20747	119,20747	23,78160	**
Tratamentos	6	172,88635	28,81439	5,74840	**
Resíduo	28	140,35248	5,01259		
Total	34	313,23833			
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$); ns - não significativo					
Fator 1 (F1) - Moagem do resíduo de vidro, 16 e 32 horas; Fator 2(F2) - Substituição de cimento por resíduo moído de vidro, 10%, 15% e 20%.					
FV - Fonte de variação; GL - Grau de Liberdade; SQ - Soma de Quadrado; QM - Quadrado Médio; F - Estatística do teste F					

Fonte: Próprio Autor.

Conforme mostrado no quadro 8, a análise independente do fator 1 (tempo de moagem) não mostra diferenças estatísticas significativas entre os valores obtidos no ensaio à compressão, assim como a análise independente do fator 2 (percentual de substituição) e também a interação entre os dois fatores. Já ao se comparara interações dos dois fatores com o traço controle, observa-se diferenças estatísticas nos valores das resistências dos traços.

A figura 33 mostra o gráfico das resistências à compressão de todos traços de argamassa aos 3 dias.

Figura 33 - Gráfico de resistência à compressão aos 3 dias



Fonte: Próprio Autor.

Quanto as resistências aos três dias, os traços que possuíam resíduo moído de vidro por 16 horas apresentaram resistências inferiores quando o percentual de substituição foi aumentado. Enquanto os traços com resíduo moído por 32 horas, esses apresentaram similaridade, não havendo diferenças relevantes entre suas resistências. O fato dos traços “A” se diferenciarem quanto a média das resistências dos traços “B” possivelmente se deve ao tipo de retificação realizada nos corpos de prova, apesar de todos eles terem tido a mesma forma de arrasamento, o corte realizado pela máquina policorte é muito agressivo, e provavelmente possa ter causado microfissuras nos corpos de prova e resultado nessa diferença.

Passando-se a análise de resistências agora com 7 dias, o quadro 10 apresenta o experimento fatorial utilizado para averiguação das interações dos fatores já explicado anteriormente.

Quadro 9 - Análise fatorial da resistência à compressão (7 dias).

EXPERIMENTO FATORIAL - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (7 DIAS)					
FV	GL	SQ	QM	F	
Fator 1 (F1)	1	12,84456	12,84456	4,85170	*
Fator 2 (F2)	2	95,42349	47,71174	18,02180	**
Int. F1 x F2	2	3,33525	1,66762	0,62990	ns
Fat x Testemunho	1	191,67808	191,67808	72,40120	**
Tratamentos	6	303,28138	50,54690		
Resíduo	28	74,12844	2,64744		
Total	34	377,40982			
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$); ns - não significativo					
Fator 1 (F1) - Moagem do resíduo de vidro, 16 e 32 horas; Fator 2(F2) - Substituição de cimento por resíduo moído de vidro, 10%, 15% e 20%.					
FV - Fonte de variação; GL - Grau de Liberdade; SQ - Soma de Quadrado; QM - Quadrado Médio; F - Estatística do teste F					

Fonte: Próprio Autor.

Ao se analisar, aos sete dias, os fatores independentes de moagem e percentual de substituição, percebe-se que os dois fatores analisados independentemente apresentaram diferenças estatísticas. Mas quanto a análise é feita interagindo os dois fatores, não é possível observar diferenças

estatísticas, conforme exposto no quadro 10. Vale salientar que tais variações estatísticas se referem as resistências à compressão e seus desvios padrões.

Conforme exposto no quadro 11, as interações entre os fatores não apresentaram diferenças estatísticas significativas para os traços com substituição parcial do cimento pelo resíduo moído de vidro.

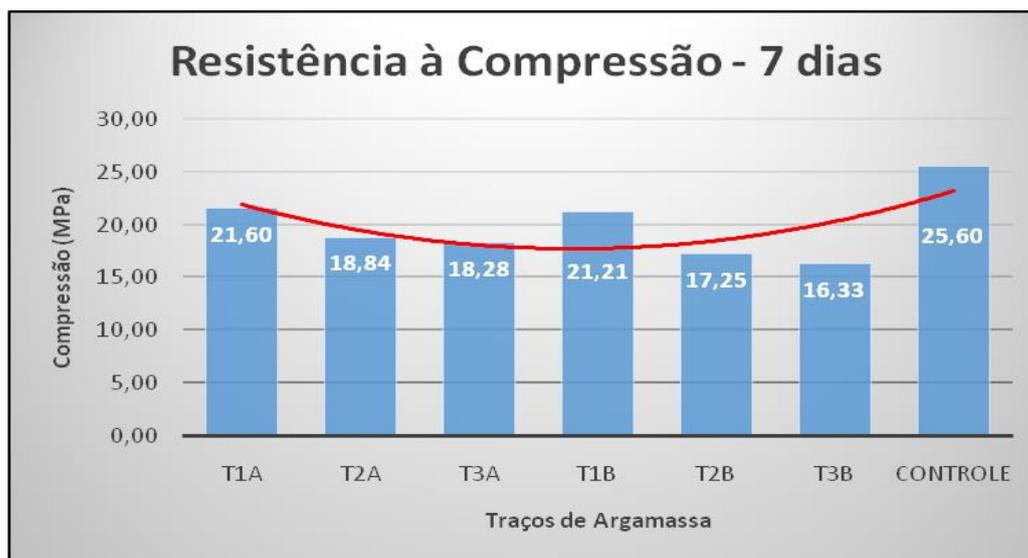
Quadro 10 - Interações entre fatores de tempo de moagem do resíduo de vidro e % de substituição (7 dias).

Médias de Interação			
Fator 1 x Fator 2 (AxB)			
A	B		
	B1	B2	B3
A1	21,5980 - aA	18,8420 - aB	18.2780 - aB
A2	21,2100 - aA	17,2500 - aB	16.3320 - aB
dms Colunas = 2,1092		dms Linhas = 2,5427	
Média Geral = 19,87371		CV= 8,19%	
Ponto médio = 23,03500			

Fonte: Próprio Autor.

Na figura 34 são apresentadas as resistências aos 7 dias de todos os traços, onde é observado que os traços T1A e T1B apresentaram resultados próximos ao traço controle. A queda na resistência com o aumento do percentual de vidro apresenta-se uniforme agora em todos os traços. Tal fato pode ser explicado pela diminuição do cimento, onde a resistência inicial, determinada pelo silicato tricálcico (C₃S) é diminuída. Com o ganho de resistência o fator da retificação dos corpos de prova não é mais tão visível, uma vez que os traços apresentam uma tendência, mas os resultados finais das resistências de todos os traços podem ter sofrido microfissuras e resultado em queda de resistências.

Figura 34 - Gráfico de resistência à compressão aos 7 dias.



Fonte: Próprio Autor.

O quadro 12, traz a análise fatorial entre as resistências apresentadas pelos traços aos 28 dias.

Quadro 11 - Análise fatorial das interações entre tempo de moagens e substituição do resíduo moído de vidro na resistência a compressão (21 dias).

EXPERIMENTO FATORIAL - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (21 DIAS)					
FV	GL	SQ	QM	F	
Fator 1 (F1)	1	0,39905	0,39905	0,06500	ns
Fator 2 (F2)	2	6,48681	3,24340	0,52800	ns
Int. F1 x F2	2	13,93929	6,96964	1,13450	ns
Fat x Testemunho	1	104,36115	104,36115	16,98960	**
Tratamentos	6	125,18630	20,86438	3,39660	*
Resíduo	28	171,99456	6,14266		
Total	34	297,18086			
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$); ns - não significativo					
Fator 1 (F1) - Moagem do resíduo de vidro, 16 e 32 horas; Fator 2(F2) - Substituição de cimento por resíduo moído de vidro, 10%, 15% e 20%.					
FV - Fonte de variação; GL - Grau de Liberdade; SQ - Soma de Quadrado; QM - Quadrado Médio; F - Estatística do teste F					

Fonte: Próprio Autor.

A análise fatorial do quadro 12 demonstra que tanto os fatores de moagem e de percentual de substituição do resíduo moído de vidro não apresentou diferenças estatísticas para as resistências. Essa tendência também é apresentada quando os fatores são interagidos. Apenas quando o traço controle é posto na análise que se percebe diferenças estatísticas entre as resistências dos traços.

O quadro 13 traz o resumo das interações dos traços com substituição onde já demonstra uma similaridade entre todos os traços.

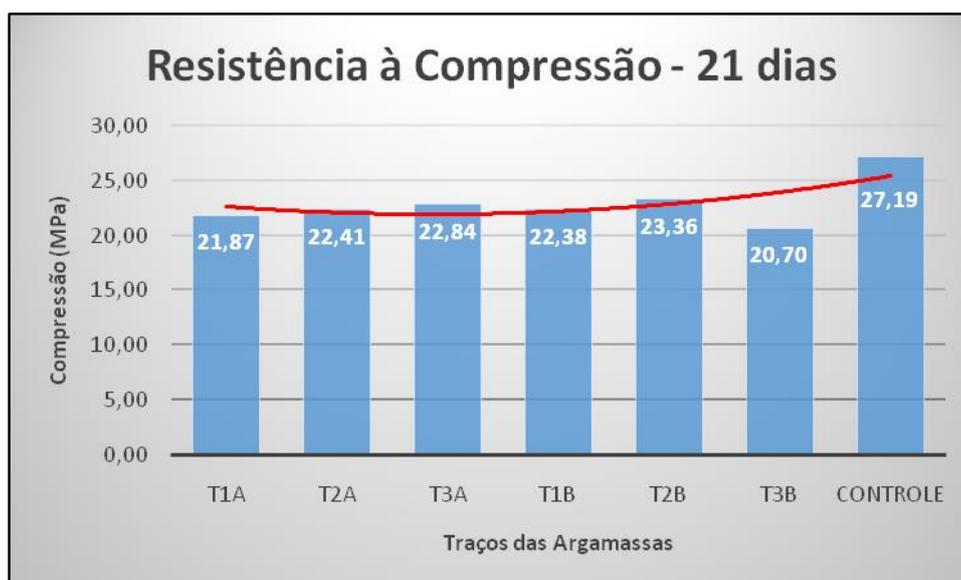
Quadro 12 - Interações entre fatores de tempo de moagem do resíduo de vidro e % de substituição (21 dias).

Médias de Interação			
Fator 1 x Fator 2 (AxB)			
A	B		
	B1	B2	B3
A1	21,872 - aA	22,412 - aA	22,840 - aA
A2	22,378 - aA	23,356 - aA	20,698 - aA
dms Colunas = 3,2128		dms Linhas = 3,8730	
Média Geral = 22,96429		CV = 10,79%	
Ponto médio = 22,16000			

Fonte: Próprio Autor.

A figura 35 mostra o gráfico de resistência de todos os traços aos 21 dias. O traço controle continua sendo o que apresenta a maior resistência entre os traços, fato esse que se mantém desde as primeiras análises. O efeito pozolânico do vidro já pode ser observado nessa fase, onde os traços com maior percentual de resíduo moído de vidro, se aproximam dos traços com menor quantidade de substituição.

Figura 35 - Gráfico de resistência à compressão aos 21 dias.



Fonte: Próprio Autor.

O quadro 14 expõe a última análise fatorial realizada nessa pesquisa com as resistências, agora aos 28 dias.

Quadro 13 - Análise fatorial das resistências à compressão (28 dias).

EXPERIMENTO FATORIAL - RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (28 DIAS)					
FV	GL	SQ	QM	F	
Fator 1 (F1)	1	58,80000	58,80000	5,81540	*
Fator 2 (F2)	2	18,48971	9,24485	0,91430	ns
Int. F1 x F2	2	0,23192	0,11596	0,01150	*
Fat x Testemunho	1	90,34432	90,34432	8,93520	**
Tratamentos	6	167,86595	27,97766	2,76700	*
Resíduo	28	283,11112	10,11111		
Total	34	450,97907			
** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 < p < 0,05$); ns - não significativo					
Fator 1 (F1) - Moagem do resíduo de vidro, 16 e 32 horas; Fator 2(F2) - Substituição de cimento por resíduo moído de vidro, 10%, 15% e 20%.					
FV - Fonte de variação; GL - Grau de Liberdade; SQ - Soma de Quadrado; QM - Quadrado Médio; F - Estatística do teste F					

Fonte: Próprio Autor.

Para a análise fatorial apresentada no quadro 14, observa-se que o fator do tempo de moagem individualmente apresenta diferenças estatísticas pela análise fatorial, enquanto o fator do percentual de substituição não apresentou diferenças estatísticas. Já a interação dos dois fatores, apresentam diferenças. Mas ao se analisar essas interações como traço controle, não é mais observada as diferenças estatísticas.

No quadro 15 é apresentado a interação entre os dois fatores analisados na análise estatística.

Quadro 14 - Interações entre fatores de tempo de moagem do resíduo de vidro e % de substituição (28 dias).

Médias de Interação			
Fator 1 x Fator 2 (AxB)			
A	B		
	B1	B2	B3
A1	24,7640 - aA	23,7340 - aA	25,7780 - aA
A2	21,7640 - aA	21,1620 - aA	22,9500 - aA
dms Colunas = 4,1219		dms Linhas = 4,9690	
Média Geral = 24,01457		CV = 13,24%	
Ponto médio = 24,89500			

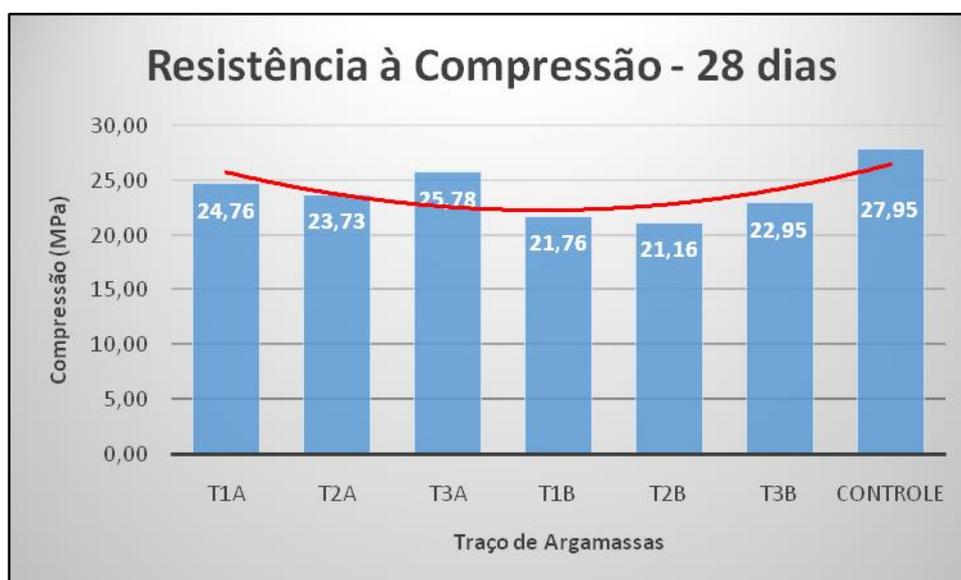
Fonte: Próprio Autor.

A figura 36 mostra as resistências de todos os traços dessa pesquisa aos 28 dias. Nesse ponto, os traços estão com suas resistências próximas

umas das outras. O fato dos traços com vidro moído por 32 horas apresentarem uma pequena queda na resistência em relação ao traço com vidro moído por 16 horas pode ser atribuída para ao método de retificação feita na superfície dos corpos de prova, que podem ter acarretado em pequenas microfissuras dentro dos mesmos, e reduzido assim a resistência à compressão.

Mas quanto as resistências apresentadas ainda no gráfico da figura 36, a média entre os traços ao analisar os desvios padrões, é possível afirmar que os traços não apresentam diferenças estatísticas, podendo considerar os traços com substituição estatisticamente iguais ao traço controle da pesquisa.

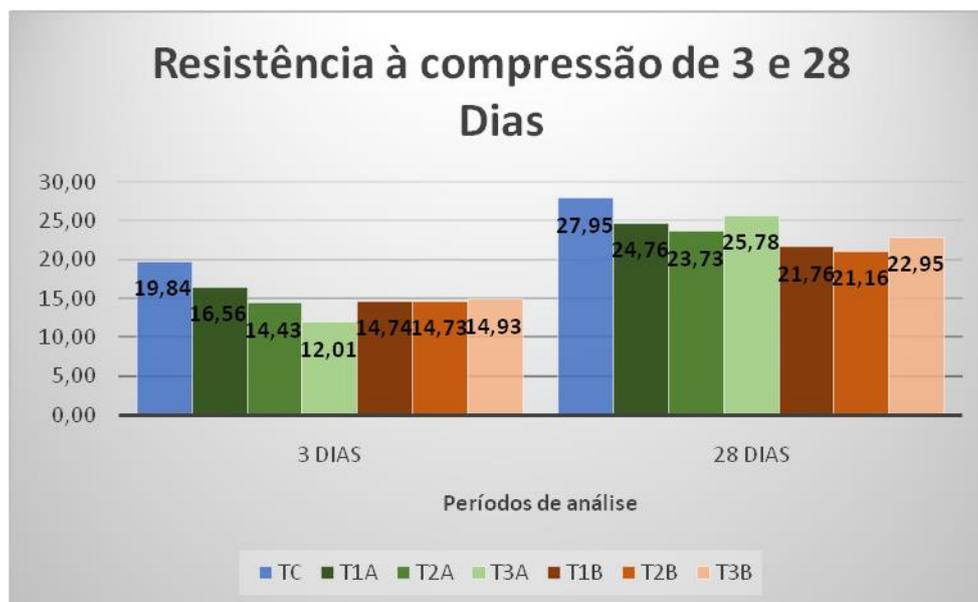
Figura 36 - Gráfico de resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Próprio Autor.

Ao analisar as resistências iniciais (3 dias) e finais (28 dias) houveram ganhos de resistência em todos os traços analisados, conforme mostrado na figura 37. Contudo pode-se observar que todos os traços que possuíam substituição de vidro tiveram valores inferiores ao traço referência, mas o aumento do percentual de vidro de 10% para 20% mostrou que a adição do vidro acarretou no aumento de resistência nos dois tempos de moagem testados (16 e 32 horas).

Figura 37 - Gráfico comparativo de resistência entre 3 e 28 dias dos traços de argamassa.



Ainda analisando o gráfico da figura 37, ratifica-se que estatisticamente, aos 28 dias, todos os traços dessa pesquisa apresentam valores estatisticamente iguais, uma vez que o traço controle que apresenta média de resistência de 27,95 MPa, e considerando seu desvio padrão de 4,35 para um nível inferior, obter-se-ia uma resistência de 23,60 MPa, sendo comparado como traço com menor valor de resistência (T2B) com valor de resistência de 21,16 MPa e seu desvio padrão de 4,13 para um nível superior, teríamos um valor de 25,29 MPa. Assim os valores se cruzam, e sendo considerados iguais.

É fato, como já comentado anteriormente, que as relações água/cimento podem ter gerado alguma interferência no parâmetro de análise das resistências, uma vez que a relação não se manteve fixa em 0,40. Mas também não seria tal situação a preponderância para as diferenças apresentadas nos quatro períodos de análise das resistências, uma vez que o traço com maior referência de água (os traços com 20% de substituição de cimento por resíduo moído de vidro), teria uma razão na ordem de 0,408 para a/c.

Assim, para tais diferenças se ratifica que o método de retificação dos corpos de prova possa ser a principal causa da falta de padrão de alguns traços, o que pode ter acarretado em uma análise equivocada em algum dos 4 períodos que foram medidas as resistências dos traços.

Finalmente, em uma análise mais abrangente, pode-se além da comprovação de outros ensaios realizados e comentados anteriormente, atestar pela resistência à compressão que o resíduo moído de vidro apresenta atividade pozolânica. Tal fato se mostra quando se comparado o melhor traço dessa pesquisa (traço controle) com o melhor traço com substituição (traço T3A) onde as razões entre suas resistências variam na ordem de 39,48%, 28,62%, 16,01% e 7,77% para 3, 7, 21 e 28 dias respectivamente. O fato do traço com resíduo moído de vidro conseguir ter um aumento mais significativo de resistência dos 3 aos 28 dias se deve a maior quantidade de hidróxido de cálcio (CH) na argamassa para a reação de hidratação do cimento.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na caracterização do agregado miúdo ficaram dentro dos limites estabelecidos pelas normas para utilização como material constituinte para confecção de argamassa. Com uma boa distribuição granulométrica, bem como os limites de materiais friáveis, pulverulentos e quantidade de matéria orgânica situaram-se dentro dos padrões aceitáveis.

A utilização do resíduo moído de vidro em argamassas de cimento Portland se mostra uma boa alternativa técnica e ambiental, sendo um material com características pozolânicas, pode substituir parcialmente o cimento Portland amplamente utilizado na construção civil.

A análise da atividade pozolânica foi obtida pelo ensaio da NBR 5752/1992, na qual foram testados o índice do resíduo moído de vidro de 16 e 32 horas. Para ser considerado um material com características pozolânicas, a norma estabelece um índice de no mínimo de 75%, sendo obtido uma IAP de 103,3% para o vidro moído a 16 horas bem como uma IAP de 98,5% para o vidro moído por 32 horas. Dessa forma o resíduo pode ser considerado um material com propriedades pozolânicas. Também foram testadas segundo a NBR 12563/2014 a característica pozolânica do vidro através da composição química, onde foi confirmada o índice de 75,72%, sendo o mínimo da norma de 70%.

Para as resistências mecânicas à compressão, os traços com substituição de cimento por resíduo moído de vidro apresentaram resistências inferiores em todos os tempos de análise em relação ao traço controle. Foi possível observar, aos 28 dias, que o traço T3A, que possui 20% substituição de cimento por resíduo moído de vidro com moagem de 16 horas apresentou o valor mais próximo do traço controle, sendo este o melhor traço apresentado na pesquisa.

Dessa forma pode-se concluir que o resíduo de vidro moído proveniente da empresa Guaporé Industria e Comercio de Vidros Ltda da cidade de Porto Velho/RO pode ser adicionado de substituição parcial do cimento em

argamassa de cimento Portland em um percentual de 20% de substituição e com tempo de moagem do resíduo na faixa de 16 horas.

Conclui-se que a utilização de resíduo moído de vidro é uma alternativa tecnicamente viável, uma vez que os resultados de resistência à compressão do traço controle e os traços com substituição parcial do cimento por resíduo moído de vidro resultaram em valores próximos. É importante salientar que a viabilidade econômica para essa utilização desse resíduo como material constituinte de concretos e argamassas demandam outros estudos mais abrangentes, uma vez que o resíduo de vidro como um material reprocessado para a indústria da construção civil geraria um custo de elevado para esse processamento. Mas é fato que os ganhos ambientais quanto a utilização do resíduo moído de vidro como material pozolânico pode sugerir uma viabilidade nessa utilização.

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A partir dos dados obtidos por essa pesquisa sugere-se outras análises para pesquisas futuras, as que se segue:

- a) Utilização de outros vidros proveniente de outras indústrias de vidro, como a de garrafas, lâmpadas e materiais que são descartados de forma equivocada e produzem grande volume de resíduo de vidro;
- b) Utilização de equipamentos que melhorem o controle de qualidade da argamassa com resíduo moído de vidro, tais como argamassadeira planetária, mesa vibratória para adensamento mecânico das argamassas bem como retificadores mais eficientes a fim de eliminar as possíveis microfissuras causadas pela retificação abrasiva;
- c) Averiguar tempos menores que 16 horas de moagem a fim de se testar a eficiência do moinho de bolas utilizado nessa pesquisa, para possível redução do gasto energético para obtenção do resíduo moído de vidro;
- d) Utilização de teores maiores de resíduo moído de vidro em argamassa de cimento Portland, para verificar a quantidade ótima a ser utilizada. Também avaliar a resistências em idades superiores as testadas nessa pesquisa;
- e) Avaliar a utilização desse resíduo moído de vidro em concretos convencionais com os agregados locais e sua influência na resistências físico-mecânicas desses concretos;

REFERÊNCIAS

AFSHINNIA, K., RANGARAJU, P. R. **Efficiency of ternary blends containing fine glass powder in mitigating alkali–silica reaction.** Construction and Building Materials Volume 100, 15 December 2015, Pages 234–245.

AGARWAL, S. K. **Pozzolanic activity of various siliceous materials.** Cement and Concrete Research. Volume 36, Issue 9, September 2006, Pages 1735-1739.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos.** Tese, D. Sc., Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 236 p, 2005

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

COMMITTEE 221. ACI 221.1R-98. **State-of-the-art: report on alkali-aggregate reactivity.** Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

_____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão – método de ensaio.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

_____. **NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15577 - 4. Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 15900-3: Água para amassamento do concreto - Parte 3: Avaliação preliminar.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

_____. **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2005.

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

_____. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

_____. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

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

_____. **NBR NM 248: Agregado - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES E PROCESSADORES DE VIDROS PLANOS – ABRAVIDRO. **Panorama ABRAVIDRO 2017, o mercado vidreiro em números.** Editorial 2017 ABRAVIDRO. Disponível em <https://app.magtab.com/leitor/136/edicao/17526>. Acessado em 22/06/2017.

BARATA, M. S. **Concreto de alto desempenho no estado do Pará: Estudo da viabilidade técnica e econômica de produção de concreto de alto desempenho com os materiais disponíveis em Belém e através do emprego de adições de sílica ativa e metacaulim.** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 1998.

BATTAGIN, A. F., BATTAGIN, I. L. DA S. **O cimento Portland no Brasil.** Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed G.C. Isaia. 2ª Ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 1v.

BAUER, L. A. **Materiais de Construção, vol I. 5ª ed.** LTC – Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro. 2015.

BAZANT, Z. P., STEFFENS, A. B. **Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete.** Cement and Concrete Research Volume 30, Issue 3, March 2000, Pages 419–428.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon.** Bilbao/España, EdicionesUrmo, 1972.

BULLARD, J. W., JENNINGS, H. M., LIVINGSTON, R. A., NONAT, A., SCHERER, G. W., SCHWEITZER, J. S., SCRIVINER, K. L., THOMAS, J. **J.Mechanismsofcementhydration.**Cementand Concrete Research. Volume 41, Issue 12, December 2011, Pages 1208-1223.

ÇAKIR, O., AKOZ, F. **Effectofcuringconditionsonthemortarswithandwithout GGBFS.** ConstructionandBuildingMaterials. Volume 22, Issue 3, March 2008, Pages 308-314.

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

CARASEK, H. **Argamassas**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed G.C. Isaia. 2ª Ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 2v.

CAVALCANTI, D. J DE H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação de mestrado. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 2006.

CEMPRE, CONSÓRCIO EMPRESARIAL PARA A RECICLAGEM. **Vidro**. Ficha técnica, artigos e publicações. Disponível em <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>. Acessado em 22/06/2017.

CICINELLI, G. C. **Álcali agregado: reação perigosa**. Revista Techne, edição 125, Editora PINI. São Paulo, Agosto de 2007.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açúcar e da casca de arroz como aditivos minerais em concretos**. Tese de D. Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 485 p, 2006.

CORINALDESI, V., GNAPPI, G., MORICONI, G., MONTENERO, A. **Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars**. Waste Management Volume 25, Issue 2, 2005, Pages 197–201.

DIAMOND, S. **A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions.** Cement and Concrete Research, v. 5, 1975.

DUCMAN, V., MLADENOVIC, A. **Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali – silica reactivity.** Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 2, February 2002, Pages 223–226.

DUNANT, C. F., SCRIVENER, K. L. **Effects of aggregate size on alkali-silica-reaction induced expansion.** Cement and Concrete Research. Volume 42, Issue 6, June 2012, Pages 745–751.

ESTEVEZ, T. C., RAJAMMA, R., SOARES, D., SILVA, A. S., FERREIRA, V. M., LABRINCHA, J. A. **Use of biomass fly ash for mitigation of alkali-silica reaction of cement mortars.** Construction and Building Materials. Volume 26, Issue 1, January 2012, Pages 687–693.

GONÇALVES, J.P. **Desenvolvimento e caracterização de concretos de baixo impacto ambiental contendo argila calcinada e areia artificial.** Tese de D.Sc. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

HARUEHANSAPONG, S., PULNGERN, T., CHUCHEEPSAKUL, S. **Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂.** Construction and Building Materials. Volume 50, 15 January 2014, Pages 471-477.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

ICHIKAWA, T., MIURA, M. **Modified model of alkali-silica reaction.** Cement and Concrete Research. Volume 37, Issue 9, September 2007, Pages 1291–1297.

ISAIA, G. C. **O concreto: da era clássica à contemporânea.** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 1. p. 1-43.

ISMAIL, Z. Z., AL-HASHMI, E. A. **Recycling of waste glass as a partial replacement for fine aggregate in concrete.** Waste Management Volume 29, Issue 2, February 2009, Pages 655–659.

JANI, Y., HOGLAND, W. **Waste glass in the production of cement and concrete – A review.** Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 2, Issue 3, September 2014, Pages 1767–1775.

KANNING, R. C., PORTELLA, K. F., BRAGANÇA, M. O. G. P., BONATO, M. M., DOS SANTOS, J. C. M. **Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement.** Construction and Building Materials. Volume 54, 15 March 2014, Pages 460-465.

KHMIRI, A., SAMET, B., CHAABOUNI, M. **A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement.**

Construction and Building Materials. Volume 28, Issue 1, March 2012, Pages 680–686.

KHMIRI, A., CHAABOUNI, M., SAMET, B. **Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars.** Construction and Building Materials Volume 44, July 2013, Pages 74–80.

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos.** In: Simpósio Nacional de Agregados, 1., 1986, São Paulo. Anais. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1986.

KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros.** In: Congresso Brasileiro de Cimento, 3., 1993, São Paulo. Anais. São Paulo, ABCP, 1993

KRIVENKO, P., DROCHYTKA, R., GELEVERA, A., KAVALEROVA, E. **Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement concretes.** Cement and Concrete Composites. Volume 45, January 2014, Pages 157–165.

LAM, C. S., POON, C. S., CHAN, D. **Enhancing the performance of pre-cast concrete blocks by incorporating waste glass – ASR consideration.** Cement and Concrete Composites. Volume 29, Issue 8, September 2007, Pages 616–625.

LIMBACHIYA, M. C. **Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete.** Construction and Building Materials Volume 23, Issue 2, February 2009, Pages 1078–1083.

LIN, K. L., HUANG, W., SHIE, J. L., LEE, T. C., WANG, K. S., LEE, C.H. **The utilization of thin film transistor liquid crystal display waste glass as a pozzolanic material.** Journal of Hazardous Materials. Volume 163, Issues 2–3, 30 April 2009, Pages 916–921.

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

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. **Concrete. Microstructure, Properties, and Materials.** 3ª Ed. USA. The McGraw-Hill Companies. 2005.

MEIER, D. **Análise da qualidade do agregado miúdo fornecido em Curitiba e Região Metropolitana.** Trabalho de Conclusão de Curso. Curso Tecnologia em Concreto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ecoville, Curitiba, 2011.

MIZUMOTO, C. **Investigação da reação álcali-agregado (raa) em testemunhos de concreto e agregados constituintes.** Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Campus de Ilha Solteira, 2009.

NASSAR, R., SOROUSHIAN, P. **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement.** Construction and Building Materials Volume 29, April 2012, Pages 368–377.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Editora Bookman, Porto Alegre/RS. 2013.

OLIVEIRA, R., DE BRITO, J., VEIGA, R. **Reduction of the cement content in rendering mortars with fine glass aggregates**. Journal of Cleaner Production Volume 95, 15 May 2015, Pages 75–88.

OZOL, M. A. **Alkali-carbonate rock reaction**. In: KLIEGER, P.; LAMOND J. F. ASTM/STP 169C: Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. Philadelphia, ASTM, 1994.

PAIVA, O. A. **Resíduo Industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. 2009. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PAIVA O.A., CORDEIRO, G.C., ROCHA F.S., LIMA S. P. B., VASCONCELOS R. P., FILHO R. D. T. **Aplicação de resíduos ultrafinos de vidro moído em argamassa de cimento Portland [Application of ultrafine waste of milled glass in Portland cement mortar]**. In: 52º congresso brasileiro do concreto [Brazilian concrete conference], 2010, Fortaleza. Anais [Proceedings]. Fortaleza: IBRACON; 2010.

PAIXÃO, C. A. B. **Utilização de refugos de revestimentos cerâmicos (porcelanato e azulejo) em substituição à areia em argamassas cimentícias**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Dissertação de mestrado. 2011.

PARK, S. B., LEE, B. C., KIM, J.H. **Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate.** Cement and Concrete Research, Volume 34, Issue 12, December 2004, Pages 2181–2189

PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto.** Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1981.

PETRUCCI, E. G. R. **Materiais de construção.** 7. ed. Porto Alegre: Globo, 1982.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de Cimento Portland.** 13 ed. Rev. por Vladimir Antonio Paulon – São Paulo: Globo, 1998.

POOLE, A. B. **Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete.** In: SWAMY, R. N. The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Glasgow/London, Blackie/New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.

RAJABIPOUR, F., GIANNINIB, E., DUNANTC, C., IDEKERD, J. H., MICHAEL, THOMAS, M. D. A. **Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps.** Cement and Concrete Research. Volume 76, October 2015, Pages 130–146.

RODRIGUES, E. P. **Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da Barragem de Pedro Beicht.** Tese de doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 1994.

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

SAOUMA, V. E., MARTIN, R. A., HARIRI-ARDEBILI, M. A., KATAYAMA, T. **A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction**. Cement and Concrete Research. Volume 68, February 2015, Pages 184–195.

SCHMITZ, A., KAMINSKI, J., SCALET, B. M., SORIA, A. **Energy consumption and CO2 emissions of the European glass industry**. Energy Policy, Volume 39, Issue 1, January 2011, Pages 142–155.

SHACKELFORD, J. F. **Introdução à Ciência dos Materiais para Engenheiros**. Tradução: Daniel Vieira; revisão técnica Nilson C. Cruz – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SHAO, Y. LEFORT, T., MORAS, S., RODRIGUEZ, D. **Studies on concrete containing ground waste glass**. Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 1, January 2000, Pages 91–100.

SHAYAN, A., XU, A. **Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs**. Cement and Concrete Research Volume 36, Issue 3, March 2006, Pages 457–468.

SENHADJI, Y., ESCADEILLAS, G., MOULI, M., KHELAFI, H., BENOSMAN. **Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar**. Powder Technology. Volume 254, March 2014, Pages 314-323.

SICHIERI, E. P., CARAM, R., DOS SANTOS, J. C. P. **Vidros na construção civil**. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. Ed G.C. Isaia. 2ª Ed. São Paulo, IBRACON, 2010. 1v.

SILVA, E. J., TASHIMA, M. M., AKASAKI, J. L. **Estudo das reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinzas de casca de arroz (CAA)**. HOLOS Environment, v. 7 n. 1, 2007 – P 72.

SHI, C., WU, Y., RIEFLER, C., WANG, H. **Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders**. Cement and Concrete Research. Volume 35, Issue 5, May 2005, Pages 987-993.

SOUSA NETO, L. M. **Utilização de resíduo de vidro moído como adição mineral para a produção de concreto autoadensável e de alto desempenho**. 2014. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

STIEVENARD-GIREAUD, D. **Etude de la réaction alcalis-silice dans les bétons**. Paris, LCPC, 1987.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London, Thomas Telford, 1997.

THOMAS, M., DUNSTER, A., NIXON, P., BLACKWELL, B. **Effect of fly ash on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction – Exposure site studies**. Cement and Concrete Composites. Volume 33, Issue 3, March 2011, Pages 359–367.

TOPÇU, I. B., BOGA, A. R., BILIR, T. **Alkali–silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3** . Waste Management. Volume 28, Issue 5, 2008, Pages 878–884.

ZAHADI, M., RAMEZANIANPOUR, A. A., RAMEZANIANPOUR, A. M. **Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration**. Construction and Building Materials. Volume 78, 1 March 2015, Pages 354-361

ZHENG, K. **Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali–silica reaction**. Cement and Concrete Composites Volume 67, March 2016, Pages 30–38.