



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO EM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL AO CIMENTO NO CONCRETO VERDE**

EMERSON LUIZ BRITO DE CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos

TERESINA

2019

EMERSON LUIZ BRITO DE CARVALHO

**ESTUDO DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO EM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL AO CIMENTO NO CONCRETO VERDE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processamento e Caracterização dos materiais.

Orientador: Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos

TERESINA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Carvalho, Emerson Luiz Brito de

C331e Estudo da aplicação de resíduo de vidro em substituição parcial ao cimento no concreto verde / Emerson Luiz Brito de Carvalho. - 2019.
78 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central Mestrado em Engenharia de Materiais, 2019.

Orientador : Prof Dr. Hudson Chagas dos Santos.

1. Ambiental. 2. Concreto verde. 3. Ganho de resistência. I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ - IFPI
CAMPUS TERESINA CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS / PPG-EM
Praça da Liberdade, 1597 - Centro - Teresina - PI CEP. 64.000-040
Fone: (86) 3131 – 9468, endereço eletrônico: <http://ppgem.ifpi.edu.br/home>

EMERSON LUIZ BRITO DE CARVALHO

ESTUDO DA APLICAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO EM SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL AO CIMENTO NO CONCRETO VERDE

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais do Instituto Federal do Piauí, como parte
integrante dos requisitos para a obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 18/06/2019.

BANCA EXAMINADORA

Assinado no original

Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Orientador

Assinado no original

Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Avaliador Interno

Assinado no original

Prof^a. Dr^a. Artemária Coelho de Andrade
Universidade Estadual do Piauí - UESPI
Avaliadora Externa

À minha amada esposa, Mayara Carneiro,
pelo incentivo, apoio e dedicação que tanto
me ajudaram nessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, Cosme de Carvalho Rocha e Maria Alzita Brito de Carvalho e toda a minha família, pelo carinho, apoio e compreensão em todos os momentos.

A todos os meus amigos, que de alguma maneira contribuíram nesse processo.

À minha esposa, meu sogro e minha sogra, pelo apoio, carinho e pelos momentos de descanso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Hudson Chagas dos Santos, pela confiança e incentivo durante a pesquisa.

Às bancas de qualificação e defesa, Prof. Dr. Jonathan Madeira de Barros Nunes, Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares, Prof. Dra. Artemária Coelho de Andrade, pelas valorosas contribuições.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM do IFPI pela oportunidade de aprendizagem e crescimento acadêmico e profissional.

A todos os colegas Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais – PPGEM do IFPI, em especial, Ana Larisse, Flávio, Felipe, Morgana, Thyago e Wendel.

A todos que participaram desta pesquisa, em especial, Raphael Moreira, Leônidas - VidroForte, Wilkins e professor Benedito – UFPI.

À FAPEPI pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa.

A todos muito obrigado!

RESUMO

Esta pesquisa busca caracterizar propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos, com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro em diferentes percentuais. Os constituintes do concreto foram caracterizados, sendo os agregados e resíduo de vidro moído quanto a sua granulometria e composição química, com a técnica de fluorescência de raios-X, cristalinidade com a técnica de difração de raio-X e atividade pozolânica. As substituições parciais do cimento pelo resíduo de vidro foram de 0%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%. No estado endurecido foram realizados os ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral nas idades de 7, 28 e 56 dias. Os resultados da caracterização do resíduo de vidro mostraram que o material é rico em sílica em estado amorfo o que promoveu um índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias de 93%. Os resultados da caracterização dos concretos mostraram que no estado fresco a adição dos percentuais de vidro estudados altera ligeiramente a trabalhabilidade e não significativamente a massa específica. No estado endurecido as adições promoveram um ganho de resistência compressão axial significativo em idades avançadas de 56 dias.

Palavras-chave: Ambiental. concreto verde. ganho de resistência.

ABSTRACT

This research seeks to characterize the physical and mechanical properties of concretes produced, with partial replacement of the cement by glass residue in different percentages. The constituents of the concrete were characterized, with the aggregates and glass residue being ground in terms of granulometry and chemical composition, with the technique of X-ray fluorescence, crystallinity with the diffraction-X and pozzolanic activity. Partial replacements of the cement by the glass residue were 0%, 5%, 7.5%, 10% and 12.5%. In the hardened state, axial compression and diametral compression tensile tests were performed at the ages of 7, 28 and 56 days. The results of the characterization of the glass residue showed that the material is rich in amorphous silica, which promoted a pozzolanic activity index with 93% cement at 28 days. The results of the characterization of the concrete showed that in the fresh state the addition of the glass percentages studied slightly altered the workability and not significantly the specific mass. In the hardened state the additions promoted significant axial compression strength gain at advanced ages of 56 days.

Keywords: Environmental. green concrete. resistance gain.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Colaboração dos componentes no ganho de resistência.....	18
Figura 2 - Resíduos industriais.....	20
Figura 3 - Cinza de casca de Arroz	22
Figura 4 - Sílica ativa com diferentes granulometrias.....	23
Figura 5 - Cinza volante	23
Figura 6 - Escória granular de alto forno	24
Figura 7 - Concreto de vidro colorido polido.....	25
Figura 8 - Resíduos de vidro	26
Figura 9 - Resistência à compressão de diferentes concretos verde	27
Figura 10 - Representação bidimensional:	31
Figura 11 - Ensaio de trabalhabilidade com argamassa contendo pó de vidro	35
Figura 12 - Fluidez do concreto com diferentes concentrações de resíduo de vidro.....	37
Figura 13 - Influência da incorporação de resíduos de vidro no tempo de endurecimento do concreto	38
Figura 14 - Gel alcalino formado devido à reação álcali-sílica	39
Figura 15 - Reação álcali-sílica reativa	40
Figura 16 - Desenvolvimento de resistência à compressão em concretos com diferentes teores de pó de vidro	42
Figura 17 - Armazenagem das chapas de vidro	44
Figura 18 - Mesa de corte computadorizada.....	44
Figura 19 - Detalhe da aresta cortante da chapa de vidro após corte da peça	45
Figura 20 - Detalhe do processo de lapidação com discos de desbaste e água.....	46
Figura 21 - Resíduo de vidro com água sendo recolhido para decantação	46
Figura 22 - Moinho de bolas utilizado para moer o resíduo de vidro.....	50
Figura 23 - Espectrômetro de fluorescência de raio X	51
Figura 24 - Difratorômetro de raio X.....	51
Figura 25 - Argamassadeira	52
Figura 26 - Betoneira utilizada no preparo dos concretos	54
Figura 27 - Aparência do concreto no momento da aferição da consistência	55
Figura 28 - Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão.....	56
Figura 29 - Difratoograma de raio X.....	59
Figura 30 - Resistência à compressão das argamassas A e B.....	60

Figura 31 - Resultados dos ensaios de abatimentos de tronco de cone	61
Figura 32 - Resultados da massa específica no estado fresco	62
Figura 33 - Valores médios de Resistência à compressão axial	63
Figura 34 - Resistência à compressão axial em relação a idade e fator água/cimento	63
Figura 35 - Valores médios de resistência à tração por compressão diametral	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de um cimento Portland típico	17
Tabela 2 - Capacidade anual de produção de vidros planos no Brasil	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3 - Comparação da composição química do cimento, areia e diferentes vidros coloridos	34
Tabela 4 - Distribuição granulométrica da areia	48
Tabela 5 - Distribuição granulométrica da brita	49
Tabela 6 - Caracterização física e química do cimento CP II F 40	49
Tabela 7 - Quantidade de materiais por betonada, teor de substituição, relação água/aglomerante e água/ cimento	53
Tabela 8 - Proporção dos materiais por betonada e teor de substituição	53
Tabela 9 - Quantidade de corpos de prova analisados	55
Tabela 10 - Composição química do vidro obtidos com FRX	57
Tabela 11 - Análises químicas	58
Tabela 12 - Resistência à compressão, índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias	59
Tabela 13 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial	62
Tabela 14 - Ganho de resistência à compressão axial entre idades: 7, 28 e 56 dias	65
Tabela 15 - Resultados dos valores médios de resistência à tração por compressão diametral.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resíduos utilizados na produção de concreto verde.....	27
Quadro 2 - Efeito da adição de resíduo de vidro em materiais a base de cimento ...	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	CONCRETO	16
2.1.2	Produção de concreto verde	21
2.1.3	Materiais residuais usados em substituição ao cimento no concreto verde	21
2.1.4	Propriedades do concreto verde no estado fresco	24
2.1.5	Propriedades do concreto verde no estado endurecido	26
2.1.6	Tendências, aplicações e desafios do concreto verde	28
2.2	VIDROS	29
2.2.1	Histórico e Definição	29
2.2.2	Produção do vidro plano	32
2.2.3	Vidro plano no mercado nacional e Reciclagem	32
2.3	CONCRETOS COM RESÍDUO DE VIDRO	34
2.3.1	Efeitos do vidro sobre a consistência	35
2.3.2	Efeitos do vidro sobre a segregação	36
2.3.3	Efeitos do vidro sobre a Hidratação do concreto	37
2.3.4	O vidro e a reação álcali-sílica	39
2.3.5	Efeitos do vidro sobre a Resistência à Compressão	41
2.4	PROCESSO DE LAPIDAÇÃO DAS CHAPAS DE VIDRO	44
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL	47
3.2	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E AGLOMERANTES	48
3.3	RESÍDUO DE VIDRO: PREPARO E CARACTERIZAÇÃO	49
3.4	ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO	52
3.5	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS	53
3.5.1	Ensaio no concreto no estado fresco	54
3.5.2	Ensaio no concreto no estado endurecido	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO	57
4.2	ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO	59
4.3	ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS	60
4.3.1	Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco	60

4.3.2	Avaliação das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido	62
5	CONCLUSÕES	68
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção movimenta a economia brasileira participando de vários setores, desde a extração de matéria-prima bruta como a areia, passando pelo beneficiamento com as indústrias que produzem louças e metais sanitários até a utilização direta destes insumos pelos construtores nas edificações.

Por ser uma cadeia longa, com vários atores internos, John (2017) estima que o setor da construção e seus produtos (edifícios, iluminação pública e materiais) consuma algo entre 20 a 25% de toda a energia utilizada no Brasil e 50% dos recursos naturais extraídos, gerando mais de 500Kg/ (habitante ano) de resíduos.

Sousa Neto (2014) destaca que dentre esses resíduos o vidro tem um papel relevante, uma vez que, o Brasil produz em média 980 mil toneladas por ano, dos quais apenas cerca de 45% são reciclados e principalmente por vidrarias em suas campanhas de reciclagem.

Neste contexto a indústria da construção pode contribuir para mitigar o impacto ambiental negativo, racionalizando seus processos, consumindo menos recursos e reutilizando materiais de descarte, para tanto, é necessário a adoção de recursos tecnológicos que viabilizem o uso mais eficaz desses materiais de descarte, uma dessas soluções é a reciclagem (FERREIRA, 2015).

Muitas pesquisas buscam viabilizar a utilização de materiais de descarte na composição de concretos, o que geraria um grande impacto positivo já que o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo. Para viabilizar essa inovação é necessário conhecer a composição e propriedades do material a ser inserido na formulação evitando efeitos deletérios ao concreto.

A reciclagem nesse sentido ocorre fechando um ciclo de sustentabilidade onde a matéria-prima utilizada na produção de peças de vidro, é descartada e se torna novamente matéria-prima para o concreto, ajudando a construir a infraestrutura para as gerações atuais sem prejudicar as gerações futuras. Esta pesquisa busca o uso racional dos recursos naturais para reduzir a geração de resíduos sólidos e o consumo de matéria-prima e energia, na produção de concretos com a reciclagem de pó de vidro gerado durante o beneficiamento de chapas de vidro utilizadas na construção civil.

O objetivo geral que orientou esta pesquisa é:

- Caracterizar propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro em diferentes percentuais.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar os materiais utilizados na produção dos concretos;
- Avaliar a reatividade pozolânica do resíduo de vidro com o cimento;
- Analisar o efeito de diferentes percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de vidro sobre as propriedades do concreto no estado fresco, analisando a consistência de acordo a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e a massa específica de acordo a NBR 9833 (ABNT, 2008) comparando-os com concreto sem a substituição (concreto de referência);
- Analisar o efeito de diferentes percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de vidro sobre as propriedades do concreto no estado endurecido, analisando a resistência a compressão de acordo a NBR 5739 (ABNT, 2007) e a resistência a tração por compressão diametral de acordo a NBR 7222 (ABNT, 2011) comparando-os com concreto sem a substituição (concreto de referência).

Com base neste panorama, o presente estudo encontra-se organizado em 5 capítulos sendo o primeiro a introdução e apresentação do objetivo do trabalho, no capítulo 2 o referencial teórico aborda o concreto e sua química básica, o concreto verde e sua produção, os resíduos utilizados em concretos verdes, suas propriedades, tendências e desafios, aborda também o histórico e definição de vidro, produção de vidro plano e reciclagem no mercado nacional, concretos com resíduo de vidro e os efeitos que provocam sobre as propriedades do concreto. Finalizando com o processo de lapidação do vidro que gera o resíduo utilizado nesta pesquisa.

O capítulo 3 trata do programa experimental apresentando ensaios de caracterização dos agregados e aglomerantes, preparo e caracterização do resíduo de vidro, a avaliação da atividade pozolânica do resíduo de vidro moído, a preparação e caracterização dos concretos.

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões da caracterização do resíduo de vidro moído, sua atividade pozolânica com o cimento, e a análise dos ensaios realizados nos concretos. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e considerações finais e no capítulo 6 referências utilizadas para a produção deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

De acordo com Ozorio (2016) o concreto é o material artificial mais consumido no mundo. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que não existe material mais consumido pelo homem em tanta quantidade, com exceção da água e estimam que a produção anual de concreto no mundo seja da ordem de 19 bilhões toneladas métricas por ano o que equivale 2,4 toneladas métricas por pessoa no mundo. Por isso são desenvolvidas muitas pesquisas sobre seu comportamento mecânico, variações de dosagens e inserção de materiais alternativos, procurando melhorar seu desempenho e otimizar o uso de seus materiais constituintes (OZORIO, 2016).

Aitcin (2000) acredita que o concreto é tão utilizado por se tratar de um material barato tendo 85% do seu volume constituído de materiais locais (água e agregados), sua produção não necessita de tecnologias muito modernas, além de ser um material resistente a solicitações mecânicas e ao fogo e ser estável e duradouro em vários ambientes.

Mehta e Monteiro (2014) atribuem o grande emprego do concreto como material de engenharia a três fatores, sendo eles:

- excelente resistência do concreto à água, diferentemente da madeira e do aço comum, o concreto resiste as ações da água sem grande deterioração, por isso é tão utilizado em estruturas de controle, armazenamento e transporte de água;
- facilidade com a qual elementos estruturais de concreto podem ser obtidos em várias formas e tamanhos;
- baixo custo e rápida disponibilidade de material já que seus componentes são baratos e encontrados e quase todos os lugares do mundo.

Os mesmos autores (2014) mencionam ainda a baixa necessidade de manutenção, resistência ao fogo e resistência a carregamentos cíclicos. Neste sentido, Ozorio (2016), afirma que hoje seria impossível imaginar a vida sem produtos à base de cimento, principalmente o concreto.

O concreto de cimento Portland, principal constituinte do concreto, é definido pela NBR 12655 (2015) como:

Material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozzolânicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da

pasta de cimento (cimento e água).

A mesma norma (2015) define agregado como um material granular, geralmente inerte, com areia, rocha britada, seixo e/ou resíduo de demolição. Os agregados miúdos são os materiais com granulometria menor que 4,75mm ressalvados os limites estabelecidos pela NBR 7211(ABNT, 2009). Já os agregados graúdos são os maiores que 4,75mm. de argamassa ou concreto.

De maneira geral, a resistência do agregado não é um fator determinante na resistência do concreto, porquê, com exceção dos agregados leves, as partículas de agregados são muito mais resistentes do que a matriz da argamassa cimentícia. Fatores como adensamento, condições de cura e relação água/cimento são de crucial importância na resistência do concreto, com destaque para a relação água/cimento que afeta a porosidade da argamassa de cimento, conforme a lei de Abrams, quanto maior o fator água/cimento, menor a resistência do concreto. De maneira simplificada o cimento promove a resistência da argamassa que promove a resistência do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Segundo Paiva (2009) os principais constituintes do cimento são o silicato tricálcico ($C_3S = 3CaO.SiO_2$), silicato dicálcico ($C_2S = 2CaO.SiO_2$), aluminato tricálcico ($C_3A = 3CaO.Al_2O_3$) e o ferro-aluminato tetracálcico ($C_4AF = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) aqui representados de maneira simplificada já que na química do cimento é adotada a seguinte representação: S = SiO_2 ; C = CaO ; A = Al_2O_3 ; F = Fe_2O_3 ; H = H_2O .

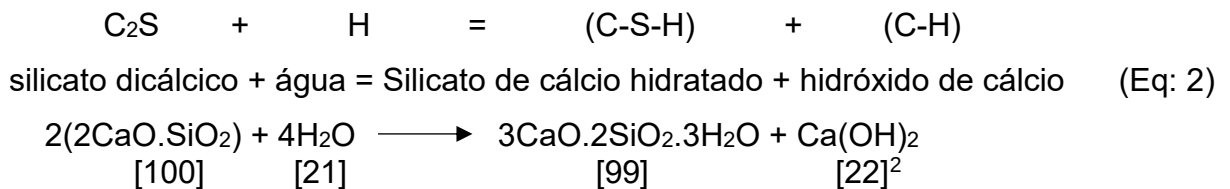
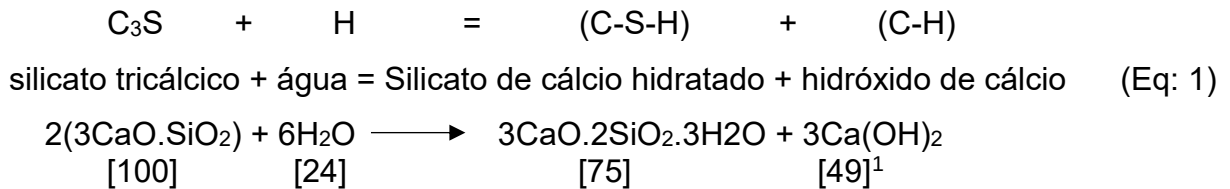
Neville e Brooks (2013) afirmam que a maior parte do cimento é composta por C_3S (tabela 1), que promove o endurecimento e o aumento resistência mecânica nas idades de 1 a 28 dias de cura. Já o C_2S promove o ganho de resistência mecânica após os 28 dias.

Tabela 1 - Composição de um cimento Portland típico

C_3S	54,1%
C_2S	16,6%
C_3A	10,8%
C_4AF	9,1%

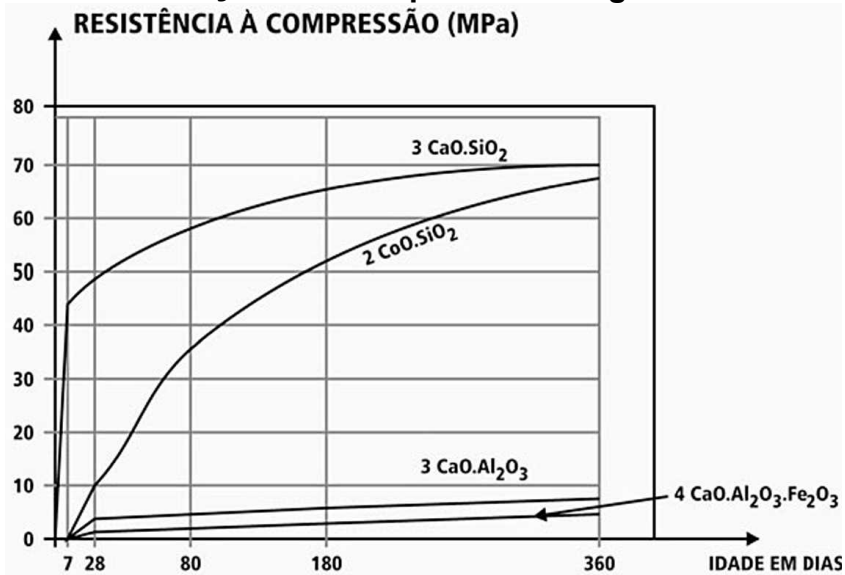
Fonte: Neville e Brooks (2013)

Estes componentes, na presença de água, produzem os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) (equações 1 e 2) responsável pela resistência mecânica, e a cal, ou hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ou portlandita) que fica livre na matriz, pouco colabora com a resistência a compressão, e diminui a resistência do concreto a ataques de ácidos e sulfatos (NEVILLE e BROOKS, 2013).



Como demonstrado por Neville e Brooks (2013), o C_3S requer aproximadamente a mesma quantidade de água para hidratação que C_2S , porém o C_3S produz mais que o dobro de Ca(OH)_2 que o C_2S . O comportamento dos componentes em relação a resistência a compressão e a idade pode ser observado na figura 1.

Figura 1 - Colaboração dos componentes no ganho de resistência



Fonte: Czernin 1962 apud Fusco 2008.

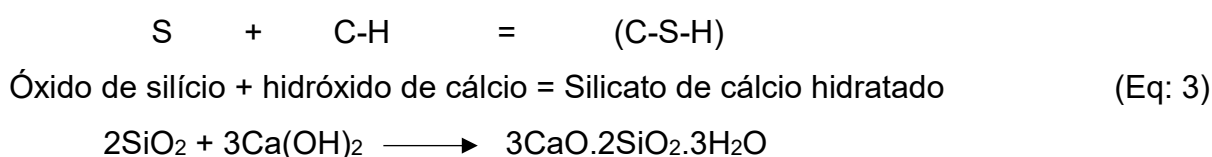
¹ Onde os números entre colchetes são as massas correspondentes de cada elemento;

² Onde os números entre colchetes são as massas correspondentes de cada elemento.

Como demonstrado nas equações 1 e 2, o C_3S requer aproximadamente a mesma quantidade de água para hidratação que C_2S , porém o C_3S produz mais que o dobro de $Ca(OH)_2$ que o C_2S .

Para Fusco (2008), como a hidratação do silicato tricálcico ocorre rapidamente, o cimento permite a fabricação de peças estruturais de concreto com características monolíticas depois de apenas algumas horas de seu preparo, e com resistência adequada aos processos de construção, com poucos dias de idade.

Outro material capaz de promover ganho de resistência mecânica no concreto é a pozolâna definida pela NBR 12653 (ABNT, 2014) como materiais silicosos ou sílico-aluminosos que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio, liberado pelo cimento na presença de água, à temperatura ambiente, para formar compostos com propriedades aglomerantes, como mostra a equação 3.



2.1.1 Concreto Verde

No mundo atual, a gestão de resíduos sólidos representa um desafio para países desenvolvidos e em desenvolvimento frente ao crescimento urbano. A demanda por concreto verde na indústria da construção é estimulada pelo aumento das exigências ambientais, com o intuito de diminuir a emissão de gases que aceleram o efeito estufa e reduzir a quantidade de resíduos nos aterros sanitários. Além disso, a indústria da construção está adotando a construção verde objetivando atender aos requisitos de projeto para as certificações LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) (LIEW, SOJOBI e ZHANG, 2017).

A alta demanda atual por recursos naturais para atender às demandas de infraestrutura criou oportunidades para o uso de materiais residuais na construção de infraestrutura mais sustentável. Esses materiais residuais desempenham o papel de materiais que complementam ou substituem parte do cimento ou que substituem o agregado graúdo e miúdo e podem ser classificados como resíduos agrícolas, industriais e municipais (KABIR, AL-SHAYEB e KHAN 2016).

Jin e Chen (2013) definiram concreto verde como concreto produzido pela

utilização de materiais residuais alternativos ou reciclados, a fim de reduzir o consumo de energia, o impacto ambiental e o consumo de recursos naturais. O concreto verde é um conceito de adoção e integração de considerações ambientais no concreto com relação à obtenção de matérias-primas, projeto de mistura, projeto estrutural, construção e manutenção de estruturas de concreto.

As desvantagens inerentes ao concreto tradicional incluem o consumo das matérias-primas naturais e emissão de CO₂. Por outro lado, o concreto verde exhibe numerosas vantagens, como melhoria nas propriedades do concreto, baixa emissão de carbono e conservação dos recursos naturais, para mencionar alguns (DASH, PATRO e RATH, 2016).

De acordo com Suresh e Karthikeyan (2016) alguns resíduos que podem ser utilizados no concreto verde incluem cinzas vulcânicas, argilas (metacaulim), cinza de casca de arroz, escória de alto forno, cinza de bagaço de cana, sílica ativa, vidro e poliestireno expandido, a figura 2 mostra outros resíduos industriais que também podem ser utilizados.

Figura 2 - Resíduos industriais



Fonte: Adaptado de DASH, PATRO e RATH (2016).

As principais barreiras para a utilização de concreto verde na construção são qualidade dos resíduos gerados, quantidade disponível de resíduo para utilização e o conhecimento técnico sobre as propriedades dos materiais a serem utilizados. Para produzir concretos verdes sustentáveis são necessários avanços tecnológicos, métodos de produção, novas formulações de cimento e diretrizes técnicas para sua produção e uso (IMBABI, CARRIGAN e MCKENNA, 2012).

2.1.2 Produção de concreto verde

Os métodos de produção de concreto verde diferem dependendo dos materiais constituintes a serem utilizados e a aplicação pretendida. Para produzir concreto verde, com suficiente trabalhabilidade, Müller *et al.* (2014) sugeriram quatro etapas básicas, a saber:

- I. Determinar experimentalmente as propriedades relevantes dos constituintes do concreto selecionados;
- II. Determine a relação água / cimento com base no cimento desejado para uma determinada resistência à compressão desejada;
- III. Otimizar a distribuição do tamanho dos agregados;
- IV. Produção e avaliação das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

Um método para otimizar a mistura de concreto verde é a otimização da granulometria do resíduo utilizado na adição ou substituição do cimento. As vantagens da otimização da mistura no concreto verde incluem minimização de vazios de ar levando à obtenção da resistência, maximização sinérgica das propriedades dos materiais constituintes (TOŠIĆ *et al.*, 2015)

2.1.3 Materiais residuais usados em substituição ao cimento no concreto verde

A utilização de cinza de casca de arroz (figura 3) na substituição do cimento oferece inúmeros benefícios ao concreto. Alguns dos benefícios incluem melhoria da microestrutura, diminuição da porosidade e aumento da resistência nas primeiras idades. Observou-se que os parâmetros ótimos da cinza de casca de arroz para maximizar suas propriedades pozolânicas no concreto variaram entre as diferentes pesquisas, principalmente devido ao processo de produção da cinza de casca de arroz (ZUNINO e LOPEZ, 2016).

Figura 3 - Cinza de casca de Arroz



Fonte: KOUSHKBAGHI et al (2019)

Zunino e Lopez (2017) utilizaram cinza de casca de arroz de diferentes fornecedores para a produção do concreto verde. Os resultados mostram que a contribuição pozolânica da cinza de casca de arroz varia com o tamanho médio das partículas, relação água-cimento, área superficial específica e porcentagem de substituição de cimento por cinza de casca de arroz.

GANESAN, RAJAGOPAL e THANGAVEL (2008) observaram que a contribuição pozolânica aumentou com o aumento da área superficial das partículas. Portanto, a fim de aumentar a contribuição pozolânica da cinza de casca de arroz no concreto, devem apresentar menor área superficial específica.

Outros parâmetros que podem afetar a substituição ótima de cimento por cinza de casca de arroz são: tipo e a dosagem do aditivo, tamanho dos agregados no concreto, porosidade do concreto e nível de ativação da cinza de casca de arroz (GASTALDINI et al., 2014).

Jamil et al. (2013) relataram que a relação percentual ótima de substituição de cinza de casca de arroz em cada tipo de cimento varia conforme a porcentagem de C_3S (silicato tricálcico), C_2S (silicato dicálcico) e a quantidade de $Ca(OH)_2$ produzida durante a hidratação do cimento.

Os impactos negativos da cinza de casca de arroz no concreto incluem redução da fluidez, alta exigência de água, e aumento na dosagem do aditivo superplastificante. Esses impactos negativos podem ser melhorados através da otimização cuidadosa dos processos de produção da cinza de casca de arroz (LIEW, SOJOBI e ZHANG, 2017).

Outro material é a sílica ativa (figura 4) cujos benefícios oferecidos no concreto estão na maior resistência a compressão e tração, aumento da atividade pozolânica,

oferece maior durabilidade ao concreto e resistência ao impacto. A dosagem ótima de sílica ativa varia entre 10 e 14% e pode ser usada em combinação com materiais como fibras de aço, nano-sílica e agregado reciclado (MASTALI e DALVAND, 2016).

Um dos impactos negativos da sílica ativa no concreto inclui a redução da trabalhabilidade, além disso, a sílica ativa não ajuda redução de fluência (ZHANG, ZHANG e YAN 2016).

Figura 4 - Sílica ativa com diferentes granulometrias



Fonte: KAREIN et al., (2017)

Dentre os benefícios derivados do uso de cinzas volantes (figura 5) no concreto verde está o aumento a resistência à compressão, flexão, densidade aparente e diminuição da porosidade; além disso ocorre uma melhoria na dureza e ductibilidade do concreto (CHOUSIDIS et al., 2016).

Figura 5 - Cinza volante



Fonte: THOMAS (2007).

A fim de garantir propriedades satisfatórias, o tempo de cura, a temperatura de cura e o tipo de materiais utilizados no concreto com cinzas volantes devem ser cuidadosamente selecionados. Condições ideais de produção também devem ser utilizadas dependendo das condições de exposição do produto FAC previsto. A cinza

volante pode ser de carvão antracito ou betuminoso, linhito ou carvão sub-betuminoso (PARK et al., 2016).

Impactos negativos das cinzas volantes no concreto incluem tempos de endurecimento prolongados, desenvolvimento de resistência lenta, baixa, dificuldades de uso na concretagem em climas frios e baixa resistência à carbonatação (MADHAVI, RAJU e MATHUR, 2014).

A escória granulada de alto-forno (figura 6) já é utilizada em larga escala na produção de cimentos como o CP II E e CP III onde os teores de da adição podem varias de 6-34% para o CP II E e de 35-75% no CP III conforme a NBR 16697(2018).

Figura 6 - Escória granular de alto forno



Fonte: SURESH e NAGARAJU (2015)

Özbay, Erdemir e Durmuş (2016) investigaram o uso da escória de alto-forno granulada moída na produção de concreto geopolimérico e cimentos de escória alcalinizada. Os benefícios da escória de alto forno no concreto foram a melhoria na durabilidade e o aprimoramento da resistência mecânica a longo prazo.

2.1.4 Propriedades do concreto verde no estado fresco

Um parâmetro importante a ser observado no concreto em estado fresco é sua consistência que influencia a sua trabalhabilidade e pode ser avaliada pelo ensaio do slump test. Bentz, Ferraris e Snyder (2013) recomendaram a avaliação cuidadosa e combinação de aditivos redutores de água juntamente com o aumento da fração volumétrica do agregado, que irá mudar de acordo com o resíduo utilizado na mistura para produzir o concreto verde.

Yijin et al. (2014) e Mukherjee, Mandal e Adhikari (2013) registraram um aumento nos valores do abatimento do concreto com o aumento da concentração de cinza volante em substituição do cimento, o que foi atribuído à alta área superficial

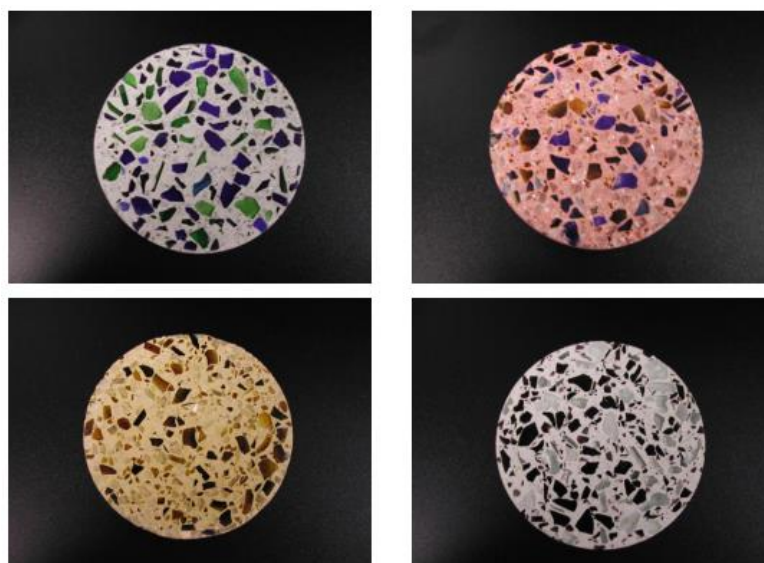
específica em comparação com o cimento Portland.

Bouzoubaa e Lachemi (2001) relataram que o concreto verde autoadensável utilizando cinzas volantes apresentam uma boa coesão e estabilidade. A segregação da mistura, no lançamento, diminui com o aumento de cinzas volantes, mas o aumento na concentração de superplastificante causa uma maior taxa de segregação na mistura. Uma relação água/cimento ideal para este tipo de concreto foi de 0,45 para obter um concreto resistente a segregação.

Para cinzas de casca de arroz, Keertana e Gobhiga (2016) relataram diminuição da consistência do concreto com o aumento na concentração da cinza de casca de arroz na mistura, enquanto Abalaka (2013) registrou aumento da consistência até 5% de substituição de cimento por cinza de casca de arroz e diminuiu a partir de então. A diminuição nos valores de abatimento foi atribuída à alta absorção de água pela cinza de casca de arroz. Frequentemente aditivo superplastificante é adicionado para melhorar a trabalhabilidade deste tipo de concreto.

Para o resíduo de vidro, Malik et al. (2013) e Liang, Zhu e Byars (2007) relataram valores crescentes da consistência no aumento na substituição de vidro como agregado miúdo, Abdallah e Fan (2014) relataram diminuição da consistência (Figura 7). As visões contrastantes podem ser devido às diferentes proporções de mistura de concreto utilizadas, às propriedades físicas dos constituintes do concreto e aos níveis de substituição investigados.

Figura 7 - Concreto de vidro colorido polido



Fonte: LIANG, ZHU e BYARS, 2007

A escolha do resíduo, bem como sua concentração, para a produção do concreto verde pode modificar o tempo de transporte e adensamento da mistura. Ikpong e Okpala (1992) relataram que o tempo de transporte e adensamento aumentou de 2 horas para 3 horas e 30 minutos, substituindo 30% do cimento por cinza de casca de arroz.

Lin et al. (2012) relataram que a utilização de resíduo de vidro diminui o tempo de transporte e adensamento com o aumento do pó de vidro (figura 8) de até 50% de substituição ao cimento. Utilizando agregado miúdo de vidro resultou em maiores valores no slump test e tempos mais longos de transporte e adensamento. O resíduo de vidro foi utilizado devido sua capacidade de impermeabilidade e maior resistência a altas temperaturas.

Figura 8 - Resíduos de vidro

1 - Areia de vidro; 2- Pó de vidro



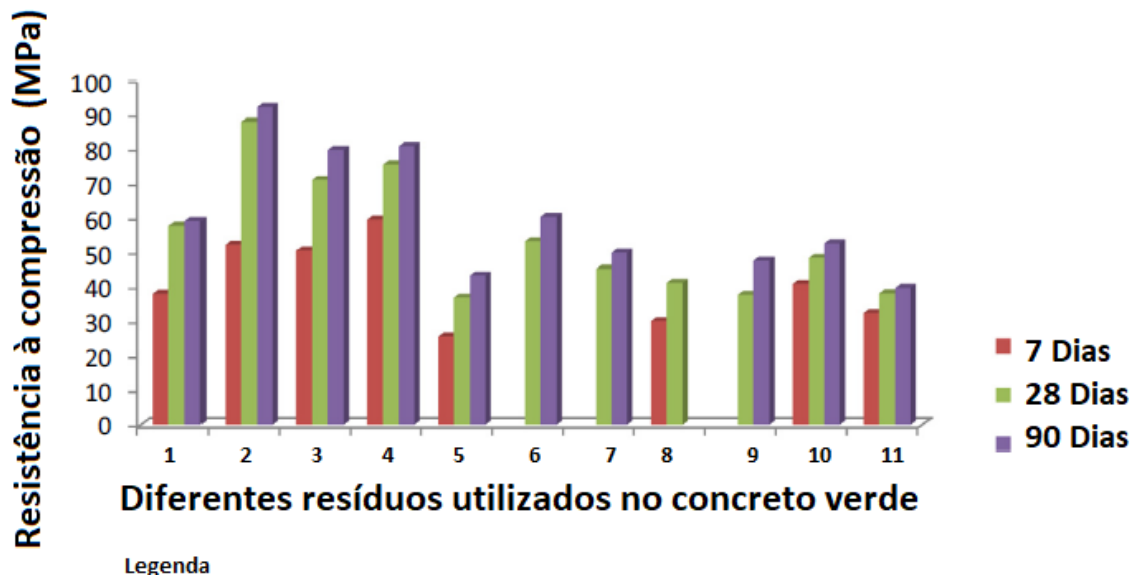
Fonte: adaptado de LIN et al. (2012)

2.1.5 Propriedades do concreto verde no estado endurecido

A fim de facilitar a comparação, os resultados de resistência à compressão obtidos por diferentes pesquisadores para diferentes concretos verdes foram apresentados na figura 9, enquanto os materiais utilizados foram dados no Quadro 1. As três maiores resistências à compressão foram de 92,1 MPa, 80 MPa e 79 MPa, e foram obtidos usando sílica ativa e nano sílica, apenas sílica ativa e cinza de casca

de arroz respectivamente, após 90 dias de cura.

Figura 9 - Resistência à compressão de diferentes concretos verde



1	Sílica ativa e agregado reciclado	7	Cinza de casca de arroz e polímero
2	Sílica ativa e nano sílica	8	Cinza de casca de arroz e escória de alto forno
3	Cinza de casca de arroz	9	Escória granular de alto forno
4	Sílica ativa	10	50% Cinza colante
5	Cinza de casca de arroz crua	11	25% Resíduo de vidro
6	Cinza de casca de arroz		

Fonte: adaptado de LIEW, SOJOBI e ZHANG (2017)

Quadro 1 - Resíduos utilizados na produção de concreto verde

Autores	Resíduo Utilizado
Çakır and Sofyanlı (2015)	Sílica ativa e agregado reciclado
Jalal et al (2015)	Sílica ativa e nano sílica
Xu et al (2015)	Cinza de casca de arroz
Xu et al (2015)	Sílica ativa
Xu et al (2015)	Cinza de casca de arroz crua
Mohseni et al (2016)	Cinza de casca de arroz
Mohseni et al (2016)	Cinza de casca de arroz e polímero
Yang et al (2016)	Cinza de casca de arroz e escória de alto forno
Boga et al (2013)	Escória granular de alto forno
Aliabdo et al (2016)	50% Cinza colante
Aliabdo et al (2016)	25% Resíduo de vidro

Fonte: adaptado de LIEW, SOJOBI e ZHANG (2017)

As diferenças nas misturas do concreto verde estão atreladas a uma diferente concentração de resíduo na mistura, tipos de cimento, presença de aditivos na mistura

e na área superficial do resíduo (KUMAR e GUPTA, 2016).

A resistência à flexão do concreto verde pode ser atribuída a concentração e tipo de resíduo utilizado na mistura em substituição ao cimento, tipos de agregados utilizados, produção do concreto e utilização de materiais para o melhoramento da resistência a flexão, como as fibras (BARBHUIYA, MUKHERJEE e NIKRAZ, 2014).

A utilização de concreto verde com fibras de aço para a produção de vigas de concreto protendido aumenta a sua resistência a flexão. A alta resistência à flexão é atribuída à presença das fibras de aço, que melhoram a ductilidade do concreto protendido, proporcionando ação de ponte, o que aumentou a energia da fratura e consequentemente a resistência à flexão (KARADELIS e LIN, 2015).

2.1.6 Tendências, aplicações e desafios do concreto verde

O concreto verde pode ser usado em blocos, revestimentos de pisos e painéis de fachada. Prevê-se que o concreto verde apresente mais aplicabilidade em construção de concreto pré-fabricada, porque é um tipo de concreto que gera um menor impacto ambiental (CAO et al., 2015).

O concreto verde com escória granular de alto forno pode ser usado quando precisa-se concretar um alto volume de concreto, pois é gerado uma menor quantidade de calor em comparação ao concreto convencional. Já o concreto verde de alta resistência pode ser utilizado em elementos protendidos e pré-moldados para a instalação de armazéns industriais e nucleares, em combinação com fibras de aço (TOPCU, 2013).

O concreto verde leve é cada vez mais utilizado em edifícios residenciais e comerciais para obter uma carga reduzida, melhor conforto térmico e acústico. O concreto verde leve reforçado com fibras de polímero pode ser utilizado em calçadas, pontes, píeres, pisos de estacionamentos (FANTILLI, CAVALLO e PISTONE 2015).

Yun-Ming et al. (2016) relataram o uso de concreto verde à base de argila na forma de ligantes geopoliméricos em concreto pré-moldado e protendido, construções com a função de isolamento térmico, produção de telhas cerâmicas e tijolos de alta qualidade.

Alguns obstáculos enfrentados nas aplicações do concreto verde na construção incluem dificuldades no cumprimento de padrões regulatórios como níveis mínimos de clínquer no concreto e composição química dos cimentos, falta ou insuficiência de

dados de durabilidade de até 20 anos ou mais. Isso exige a revisão de vários códigos normativos da construção para torná-los mais ecológicos e incentivar a adoção de concreto verde (LIEW, SOJOBI e ZHANG, 2017).

Diretrizes e tecnologias acessíveis para processamento e produção eficientes de concreto verde são necessárias juntamente com dados de desempenho para justificar e informar mudanças nos códigos e normas de construção. A geração de dados a longo prazo da utilização do concreto verde estrutural é necessária para padronização deste tipo de concreto. Dados como fluência e abrasão também são poucos disponíveis (SANDHU, SIDDIQUE; 2017).

Roy (1999) apontou como desafios para utilização do concreto verde a melhor compreensão do mecanismo de reação do concreto, melhor caracterização de diferentes combinações complexas de concretos verdes no estado fresco e endurecido e efeitos de diferentes parâmetros de beneficiamento das matérias-primas no desempenho de concretos verdes.

O desenvolvimento de ativadores novos e acessíveis é necessário para incentivar o desenvolvimento sustentável e a implantação de concreto verde em aplicações de campo. Também são necessárias técnicas de caracterização baratas e acessíveis, especialmente para os países em desenvolvimento, onde o custo de pesquisa e desenvolvimento não é acessível. Incentivos também devem ser dados a empresas de construção, universidades e institutos de pesquisa para iniciar o desenvolvimento e a aplicação de concreto verde em seus projetos de infraestrutura (LIEW, SOJOBI e ZHANG, 2017).

2.2 VIDROS

2.2.1 Histórico e Definição

Acredita-se que os primeiros vidros foram produzidos intencionalmente pelo homem com a finalidade de adorno, por volta de 3.500 a.C., provavelmente na Síria (ISAIA, 2018). No século 1, na costa sírio-judaica, houve uma grande revolução na arte de produzir objetos de vidro com a invenção da técnica de sopro, que consiste em colher uma porção de vidro fundido na extremidade de um tubo e soprar na outra, dando origem a uma peça oca, tornando mais fácil a produção de frascos e recipientes. O uso de recipientes de vidro se disseminou no Império Romano (ISAIA, 2018).

A produção de vidro transparente foi descoberta por volta do ano 100 d.C., na Alexandria, com a adição de dióxido de magnésio. A partir desse contexto, vidros relativamente planos passaram a ser utilizados por arquitetos romanos em janelas, deixando passar luminosidade para o interior das casas de famílias abastadas. Placas eram fabricadas a partir de formas ocas e alongadas, obtidas por sopro, cortadas longitudinalmente e esticadas enquanto o vidro ainda se mantinha viscoso. Até hoje se utiliza a técnica do sopro para moldar diversos tipos de embalagens (SMITH, HASHEMI; 2013).

Nos séculos XVIII, XIX e XX, com a Revolução Industrial e o desenvolvimento da física e da química, a indústria vidreira cresceu bastante, tanto os processos de fabricação, que passaram a ser automáticos e intensivos, quanto à aplicação do vidro, que pela redução considerável de preço deixou de ser um artigo de luxo (SMITH, HASHEMI; 2013).

Os vidros são definidos por Callister (2016), como um grupo familiar de cerâmicas, compostos por silicatos não-cristalinos contendo também outros óxidos como CaO , Na_2O , K_2O , Al_2O_3 os quais influenciam suas propriedades. A composição química do vidro de cal soda comumente utilizado em recipientes, contém aproximadamente 70% SiO e o restante é composto de CaO (cal) e Na_2O (soda).

A não cristalinidade do vidro significa que ele possui átomos irregulares e não repetitivos, diferente das estruturas atômicas dos sólidos cristalinos, que apresentam átomos empilhados e estruturas regulares e repetitivas. Suas principais características são a transparência óptica e a relativa facilidade com a qual podem ser fabricados (CALLISTER, 2016).

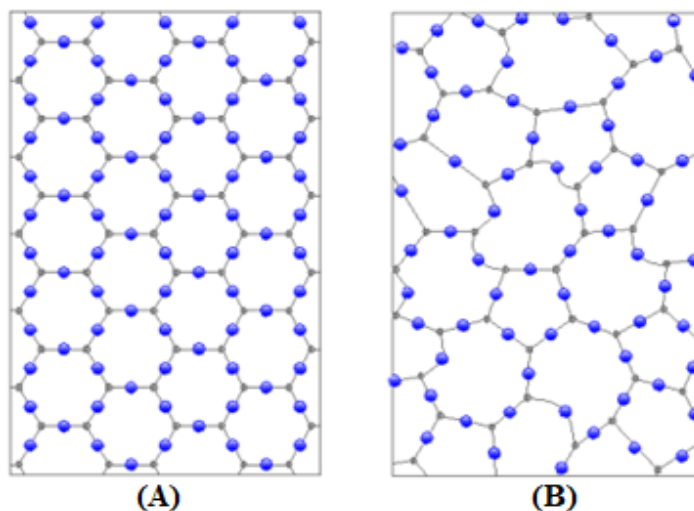
Com a publicação do artigo "The atomic arrangement in glass", Zachariasen (1932) estabeleceu a teoria estrutural para formação de vidros por fusão/resfriamento, propondo um arranjo atômico estendido em uma rede tridimensional, com forças interatômicas comparáveis às do cristal de mesma composição, mas com ausência de simetria e periodicidade de longo alcance (ou seja, várias distâncias interatômicas).

A figura 10 representa, em um esquema bidimensional, o arranjo cristalino, simétrico e periódico de um cristal e a rede assimétrica e aperiódica de um vidro de mesma composição.

Figura 10 - Representação bidimensional:

(A) composto hipotético com arranjo cristalino simétrico e periódico

(B) rede do vidro de mesma composição, em que fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade



Fonte: adaptado de ALVES, GIMENEZ e MAZALI (2001).

Materiais cristalinos possuem átomos distribuídos periodicamente e regularmente no espaço, figura 10 (a), e são anisotrópicos, ou seja, suas propriedades dependem significativamente da orientação cristalográfica. Por sua vez, os vidros apresentam isotropia e distribuição atômica irregular, como observado na figura 10 (b). Os vidros apresentam semelhanças com dois estados da matéria, líquido (no que se refere à estrutura atômica) e sólido (no que se refere à rigidez dos átomos na estrutura). Também apresentam escoamento viscoso, observada em altas pressões. O estado vítreo é a combinação do tempo de rigidez curto, característico dos elementos cristalinos, e o tempo de fluidez longo, dos líquidos (CALLISTER, 2016).

Zarzycki (1991) definiu vidro como um sólido não cristalino que exhibe o fenômeno de transição vítrea. Atualmente essa é a definição mais aceita no meio científico. Essa definição considera o aspecto fenomenológico, pois nem todo sólido não cristalino apresenta o fenômeno de transição vítrea, assim como o aspecto estrutural, pois afirma que o vidro é um material não cristalino.

Os vidros estão presentes em diversos setores produtivos e podem ser classificados em: vidros para embalagem, que compreendem garrafas, potes e frascos; vidros planos para janelas e portas e também os utilizados em automóveis, fogões, geladeiras, box para banheiro; vidros domésticos, que incluem os copos,

jarras e outros vasilhames; vidros técnicos que incluem os vidros utilizados em lâmpadas, em lentes oftalmológicas, em vidrarias laboratoriais, para garrafas térmicas; e as fibras de vidro que compreendem mantas, compósitos plásticos, e outras aplicações como material de reforço ou isolamento (FERRARI et al., 2018).

2.2.2 Produção do vidro plano

De acordo a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO (2018) o vidro pode ser classificado basicamente em três composições químicas. O Vidro sodo-cálcico utilizado em embalagens, garrafas, potes, indústria automobilística, construção civil e eletrodoméstico; O Vidro boro-Silicato empregado na fabricação de utensílios domésticos por resistir ao choque térmico. E o vidro ao chumbo para fabricação de copos, taças, cálices e peças artesanais que requerem brilho.

A ABIVIDRO (2018) descreve o processo de fabricação e cadeia produtiva no Brasil com início na extração dos minerais que são a matéria-prima para as usinas. As usinas produzem as chapas de vidro plano em dimensões padronizadas, nas tonalidades incolor, verde, bronze e cinza e em espessuras que variam de 2 a 19 mm, podendo-se produzir chapas de 25 mm.

Este processo ocorre em cinco etapas principais. A primeira é a mistura, onde as matérias-primas são dosadas, misturadas e enviadas ao forno de fusão. Em seguida ocorre etapa de fusão, na qual a composição é fundida a 1600°C em um processo lento e controlado. A terceira é a transformação, em que o vidro fundido flutua sobre uma piscina de estanho a 650°C formando a lâmina de vidro. A quarta etapa é o recozimento, processo no qual a lâmina de vidro é recozida num forno que resfria a chapa de forma controlada. E na quinta etapa, a etapa de corte, a lâmina de vidro é inspecionada contra defeitos, cortada em chapas que são empilhadas e podem ser transportadas ABIVIDRO (2018).

Os fabricantes comercializam as chapas de vidro às distribuidoras e processadoras que farão o beneficiamento dos produtos destinados ao consumidor. Nestas processadoras, o vidro é processado para chegar a forma de aplicação desejada passado por processos de tempera, laminação, espelhamento, lapidação ABIVIDRO (2018).

2.2.3 Vidro plano no mercado nacional e Reciclagem

A capacidade nominal de produção de vidros planos no Brasil tem diminuído desde 2014 saindo de 6.950 toneladas por dia para 6.680 segundo a Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos – ABRAVIDRO. A tabela 2 mostra a capacidade nominal de produção de vidros planos no Brasil (toneladas/dia) desde 2011 até 2018.

Produtor	Planta	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
CEBRACE	C1	900	900	900	900	900	900	900	900
	C2	600	600	600	600	600	600	600	600
	C3	600	600	600	600	600	600	600	600
	C4	600	600	600	600	600	600	600	600
	C5	-	900	900	900	900	900	900	900
GUARDIAN	RJ	600	600	600	600	600	600	600	600
	SP	800	800	830	830	830	830	800	800
VIVIX	PE	-	-	-	900	900	900	900	900
AGC	SP	-	-	600	600	600	600	600	600
SAINT-GOBAIN GLASS	SP	160	160	180	180	180	180	180	180
UBV	SP	240	240	240	240	240	240	240	-
TOTAL		4.500	5.400	6.050	6.950	6.950	6.950	6.920	6.680

Fonte: Adaptado de Panorama ABRAVIDRO, 2018.

Atualmente a produção de vidro utiliza 47% de matéria-prima oriunda de reciclagem, este valor representa a reciclagem de vidros empregados principalmente em recipientes como garrafas. Uma estimativa realizada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA mostra que o vidro representava cerca de 2,3% dos resíduos sólidos gerados no Brasil no ano de 2010.

Informações publicadas no Panorama de Resíduos Sólidos demonstram que em 2017 foram coletados no Brasil 71,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos com cerca de 42,3 milhões de toneladas sendo dispostas em aterros sanitários e 29 milhões de toneladas sendo dispostas em locais inadequados sejam em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações. No Brasil, 123.421 toneladas/dia de resíduos de construção e demolição. No Nordeste são produzidas 55.492 toneladas/dia de RSU sendo 4.727 toneladas/dia de resíduos de construção e demolição (ABRELPE, 2018).

Em Teresina-PI das 829,86 toneladas de resíduos recolhidas pela coleta seletiva em 2018, 338,34 t ou 41% são de vidro, este é o segundo maior quantitativo

menor apenas que o de papel com 401,91t ou 48%³.

2.3 CONCRETOS COM RESÍDUO DE VIDRO

Quimicamente, o vidro contém grandes quantidades de silício e cálcio com uma estrutura amorfa, tendo a possibilidade de atuar como um material pozolânico no concreto (Tabela 3). Por isso, o resíduo de vidro tem sido usado no concreto como agregado ou substituição parcial do cimento.

Tabela 2 - Comparação da composição química do cimento, areia e diferentes vidros coloridos

Composição	Cimento (%)	Vidro transparente (%)	Vidro castanho (%)	Vidro verde (%)	Vidro esmagado (%)	Pó de vidro (%)	Areia (%)
SiO ₂	20,2	72,42	72,21	72,38	72,61	72,2	78,6
Al ₂ O ₃	4,7	1,44	1,37	1,49	1,38	1,54	2,55
CaO	61,9	11,5	11,57	11,26	11,7	11,42	7,11
Fe ₂ O ₃	3	0,07	0,26	0,29	0,48	0,48	2,47
MgO	2,6	0,32	0,46	0,54	0,56	0,79	0,46
Na ₂ O	0,19	13,64	13,75	13,52	13,12	12,8 5	0,42
K ₂ O	0,82	0,35	0,2	0,27	0,38	0,43	0,64
SO ₃	3,9	0,21	0,1	0,07	0,09	0,09	-
TiO ₂	-	0,035	0,041	0,04	-	0,09	-

Fonte: adaptado de PAUL, ŠAVIJA e BABAFEMI (2018).

Embora uma parte deste vidro seja prontamente reciclada na indústria de fabricação de vidro, nem todos os vidros usados podem ser reciclados em vidro novo devido a impurezas, custos ou cores misturadas. Por isso, há várias décadas, iniciou-se uma pesquisa sobre a possibilidade de usar resíduos de vidro na produção de concretos (PAUL, ŠAVIJA E BABAFEMI; 2018).

A utilização de resíduos de vidro no concreto, como material pozolânico ou agregado, afeta o seu comportamento (Quadro 2), devendo-se ser feito seu estudo para avaliar as mudanças micro e macro do concreto.

³ Informação coletada diretamente com a Coordenação Especial de Limpeza Pública – CELIMP vinculada à Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação - SEMDUH.

Quadro 2 - Efeito da adição de resíduo de vidro em materiais a base de cimento

Autores	Tipo de resíduo de vidro	Concentração de vidro (%)	Tipo de Ensaio	Resultados
(Bostanci et al., 2018)	Agregado fino	15	Mecânica e durabilidade	Sem diferença significativa
(Gautam et al., 2018)	Agregado fino	10 a 50	Mecânico	Até 20% de resíduo foi aceitável
(Lu e Poon, 2018)	Agregado fino	25 a 100	Fresca, mecânica e durabilidade	Trabalhabilidade e resistência ao fogo melhoradas, mas resistência a compressão reduzido.
(Bisht e Ramana, 2018)	Agregado fino	18 a 24	Fresca, mecânica e durabilidade	Até 21% de resíduo foi aceitável
(Atoyebi e Sadiq, 2018)	Agregado fino	10 a 30	Mecânico	Até 20% sem alteração na resistência
(Paul, Šavija e Babafemi 2018)	Pó de vidro	10 a 30	Mecânico	Até 10% de resíduo foi aceitável
(Rodier, 2018)	Pó de vidro	10 a 30	Mecânico	Até 30% de resíduo foi aceitável

Fonte: adaptado de PAUL, ŠAVIJA e BABAFEMI (2018)

2.3.1 Efeitos do vidro sobre a consistência

A consistência do concreto é definida como a facilidade de manuseio e determina a facilidade com que o concreto pode ser moldado no local. Quando o cimento é substituído por resíduos de pó de vidro reciclado em misturas de argamassa, por exemplo, como mostrado na figura 11, não é observada diferença significativa na queda de consistência (ISLAM, RAHMAN e KAZI, 2017).

Figura 11 - Ensaio de trabalhabilidade com argamassa contendo pó de vidro
(a) Antes do ensaio; (b) Depois do ensaio



Fonte: ISLAM, RAHMAN e KAZI (2017)

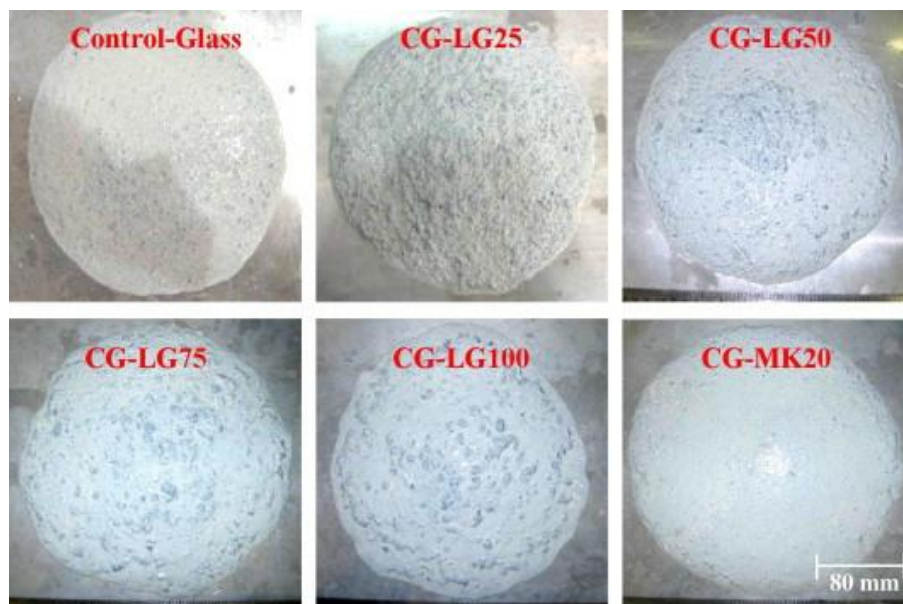
Nassar e Soroushian (2012) destacam que um aumento na consistência foi relatado, atribuído à baixa absorção de água do vidro; No entanto, Kamali e Ghahremaninezhad (2016) verificaram que a influência dos resíduos de vidro como substituto do cimento na consistência depende do tipo de pó de vidro. Em seu estudo, eles testaram dois pós de vidro provenientes de diferentes processos de reciclagem: enquanto um resultou em aumento da consistência, o outro mostrou uma tendência oposta. No entanto, com uma substituição parcial de cimento e areia por resíduos de vidro em pó, atuando como aglutinante e agregado fino, respectivamente, a consistência do concreto reduziu significativamente (Adaway e Wang, 2015; Park, Lee e Kim, 2004).

Quando o pó de vidro residual é usado como substituto agregado, ele pode produzir uma trabalhabilidade diferente em comparação com o concreto utilizando areia natural. Vários estudos relataram uma diminuição na trabalhabilidade proporcional à porcentagem de resíduos de vidro usados no concreto (Chen et al., 2006; Limbachiya, 2009; Topcu, 2013). Isso é atribuído à geometria do vidro residual: bordas mais afiadas, formato mais angular e maior proporção de partículas de vidro reduzem a fluidez da argamassa, dificultando o movimento da pasta de cimento e das partículas (Tan e Du, 2013).

2.3.2 Efeitos do vidro sobre a segregação

O efeito do resíduo de vidro em relação a segregação (figura12) foi estudado por (Ling e Poon, 2011). A forma plana e a superfície lisa dos agregados de vidro contribuíram para maiores taxas de segregação nas misturas. O aumento da segregação está diretamente relacionado com o aumento da concentração de resíduo de vidro na mistura.

Figura 12 - Fluidez do concreto com diferentes concentrações de resíduo de vidro



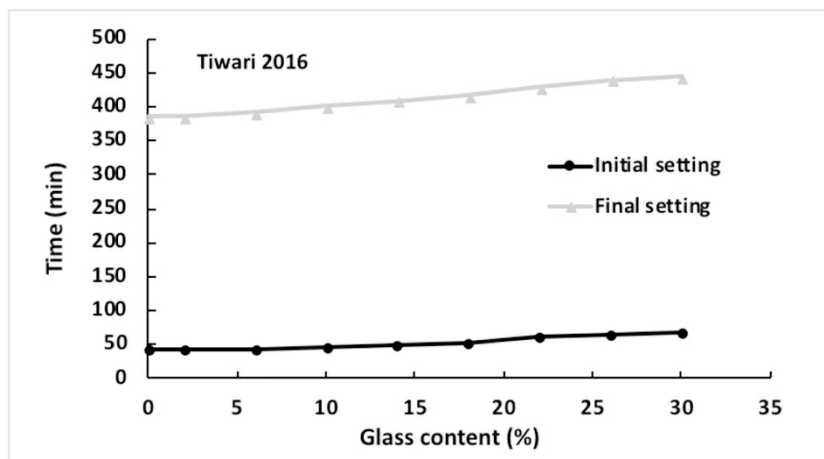
Fonte: Ling e Poon (2011).

Da mesma forma, Taha e Nounu (2008) observaram uma grande segregação quando houve uma substituição de areia natural entre 50 e 100 % por resíduo de vidro colorido. A segregação na mistura, quando em uma quantidade elevada (30%) de cimento, foi substituída por resíduos de vidro. Quando se trata de concreto auto-adensável. Kou e Poon (2009) constataram que a segregação aumentou em proporção ao percentual de resíduos de vidro. Em geral, pode-se observar-se que a segregação aumenta com o aumento do teor de resíduo de vidro na mistura.

2.3.3 Efeitos do vidro sobre a Hidratação do concreto

A Figura 13 mostra a influência da incorporação de diferentes porcentagens de resíduos de vidro em pó no tempo de endurecimento do concreto. Pode ser visto que os tempos inicial e final de ajuste do concreto aumentam à medida que o conteúdo do vidro aumenta. Estudos como os de Kamali e Ghahremaninezhad (2016), Schwarz, Cam e Neithalath (2008) relataram que o pó de vidro facilita a hidratação da pasta de cimento. Os primeiros autores (2016) afirmam que até 20% de adição de pó de vidro no concreto não leva a mudanças significativas no tempo de endurecimento da pasta de cimento.

Figura 13 - Influência da incorporação de resíduos de vidro no tempo de endurecimento do concreto



Fonte: (Tiwari et al., 2016)

A reação de hidratação é afetada por uma substituição parcial do cimento Portland pelo vidro reciclado. Primeiro, a taxa máxima de evolução do calor e o calor total gerado reduzem-se continuamente com maior porcentagem de substituição de OPC devido à diluição do cimento e à reação pozolânica mais lenta do vidro residual (Du e Tan, 2014; Kamali e Ghahremaninezhad, 2016).

O menor calor de hidratação é benéfico para evitar fissuras relacionadas à temperatura, que é comum em elementos estruturais espessos. Pequenas partículas de vidro podem atuar como locais de nucleação para a formação do produto de hidratação, principalmente CSH, aumentando assim a taxa da reação de hidratação (Du e Tan, 2014).

Nos estágios posteriores do processo de hidratação, o hidróxido de cálcio (CH) é consumido na reação pozolânica do vidro residual. O hidróxido de cálcio da hidratação do cimento reage lentamente com a sílica do pó de vidro para formar CSH (silicato de cálcio hidratado), com isso, com a maior substituição de pó de vidro, o hidróxido de cálcio diminui consistentemente na pasta hidratada. Portanto, existe uma quantidade máxima de vidro residual que pode ser usado como substituto do cimento (Idir et al., 2011).

Du e Tan (2014) sugeriram que a máxima substituição de cimento por resíduo de vidro fosse de 60%, mais tarde, no entanto, eles observaram (com base no conteúdo de CH) que a reação pozolânica completa pode ocorrer apenas se o

conteúdo de pó de vidro residual estiver abaixo de 30 a 45%. Portanto, alguns resíduos de vidro é um material pozolânico promissor, que exibe pozolanicidade a níveis iguais que as cinzas volantes.

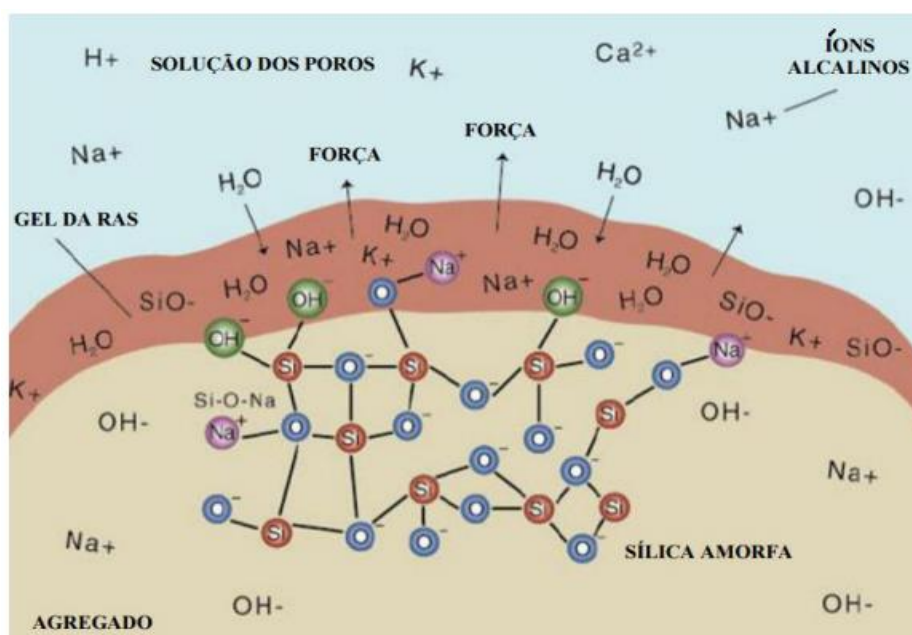
2.3.4 O vidro e a reação álcali-sílica

A inclusão de agregados de vidro no concreto pode desencadear a reação. Tipicamente, a natureza rica em sílica e estrutura amorfa do pó vidro reage com hidróxido de cálcio do cimento e forma um gel silicioso. Este gel dentro da pasta de cimento absorve água e expande, gerando uma pressão de dilatação suficiente que pode causar microfissuras, expansão e, finalmente, deterioração do concreto circundante (DYER, DHIR; 2001).

A figura 14 mostra a ação do gel alcalino formado devido a reação álcali-sílica que segundo Jin, Meyer e Baxter (2000) ao absorver água expande, exercendo pressão osmótica sobre a pasta de cimento ou o agregado.

A reação álcali agregado é de natureza físico-química e considerada lenta, ocorrendo em presença de água, entre os álcalis do cimento e alguns agregados reativos, causando o aparecimento do gel expansivo na interface pasta-agregado (figura 15), devido a isso, estudos com o uso de vidro em misturas cimentícias em substituição ao agregado podem não ter bons resultados.

Figura 14 - Gel alcalino formado devido à reação álcali-sílica



Fonte: MUNHOZ (2007).

Figura 15 - Reação álcali-sílica reativa
Estados de alteração (1 a 4) de quartzo – filoneado em gel.



Fonte: (SILVA, 1992).

Para Liew et al (2016), os principais parâmetros que influenciam a formação do gel expansivo são:

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

Para minimizar a reação álcali agregado, Liew et al (2016) listou alguns meios empregados para combater esta reação:

- não utilizar agregados com sílica reativa;
- utilizar cimentos com teor de álcali, expresso em óxido de sódio, inferior a 0,6% em relação à massa do cimento;
- utilizar pozolânas, escória granulada de alto-forno entre outras adições em quantidade e qualidade suficientes;
- usar baixas relações água/ligante;
- evitar umidade, que é imprescindível para ocorrer à reação.

De acordo com Idir et al. (2011), o tamanho das partículas de vidro é um parâmetro importante que deve ser controlado, pois influenciar nas principais propriedades da matriz cimentícia, já que a incorporação do vidro à essa matriz pode promover a reação álcali-sílica, que influencia o desempenho mecânico e a durabilidade.

Maraghechi et al. (2012) observaram que em matrizes cimentícias com incorporação de resíduo de vidro de granulometria inferior a 100 µm as expansões por álcali-sílica foram controladas. Du e Tan (2014) afirmam que as expansões devido à reação álcali-sílica são controladas apenas quando o resíduo de vidro é utilizado em fina granulometria, ou seja, partículas menores que 75 µm.

Na faixa de 75 µm o resíduo de vidro se torna um inibidor da RAS, pois devido à grande quantidade de sílica amorfa existente em sua composição, quando dividido em pequenas partículas, passa a apresentar alta atividade pozolânica (KHMIRI et al., 2012).

2.3.5 Efeitos do vidro sobre a Resistência à Compressão

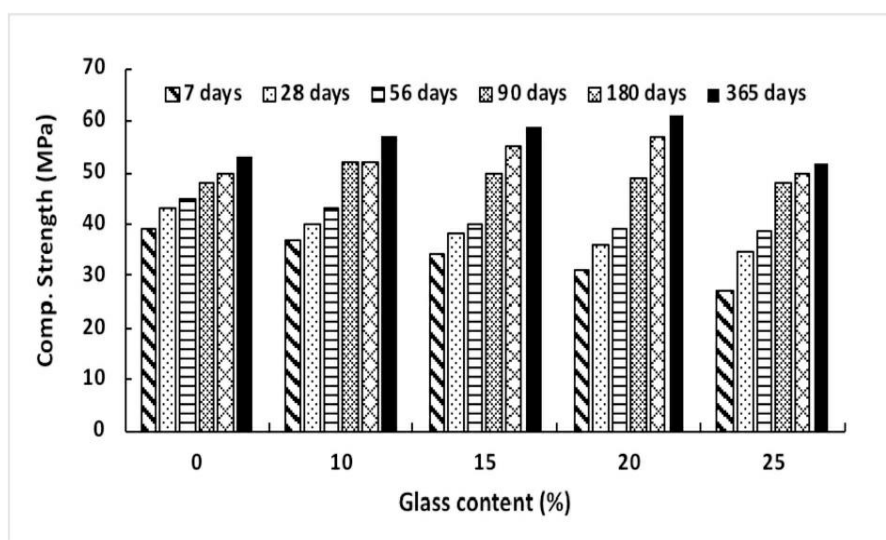
O resíduo de vidro pode ser usado no concreto como agregado e na substituição do cimento na mistura. Sendo agregado sua forma e tamanho influenciara as forças de ligação na mistura do concreto, na substituição por cimento resultara em uma maior reação pozolânica na mistura. A interação entre essas duas influências determinará o efeito resultante na resistência à compressão (Alomayri, 2017).

Silva (2015) estudou substituição parcial/total agregado graúdo, brita 0, por vidro moído. Os resultados da pesquisa indicaram que para fatores água/cimento menores que 0,55 a substituição de 50% da brita 0 por vidro temperado moído é possível a confecção de concretos estruturais com classe de resistência maiores ou igual a C20.

Vários pesquisadores examinaram a influência da incorporação do pó de vidro no concreto em sua resistência à compressão, dentre eles Afshinnia e Rangaraju (2016), que relataram um decréscimo na resistência à compressão como resultado de resíduos de vidro reciclados usados como agregados. Isso foi atribuído ao fato de que a interação pasta e agregado é mais fraca quando comparada com a areia de quartzo.

Islam et al. (2017) observaram que embora a resistência à compressão seja menor nas primeiras idades, a resistência aumenta ao longo do tempo. Como mostrado na Figura 16, até 90 dias, a resistência à compressão do concreto diminui com o aumento da quantidade de areia de vidro. No entanto, nas mesmas misturas, o ligeiro incremento na resistência foi observado para a substituição de areia de vidro até 20%. Nenhuma mudança significativa na força foi notada para misturas com mais de 20% de areia de vidro. Isso pode ser devido ao fato de que até 20% de substituição de cimento ou areia por resíduos de vidro em pó podem elevar a reação pozolânica e também agir como material de preenchimento, preenchendo a maioria dos vazios entre os grandes agregados no concreto (ISLAM et al., 2017).

Figura 16 - Desenvolvimento de resistência à compressão em concretos com diferentes teores de pó de vidro



Fonte: Islam et al., 2017.

Miranda Junior (2012) verificou a influência da substituição do agregado fino por resíduo de vidro sobre as características mecânicas de concretos. Ele comparou a resistência a compressão de concretos produzidos com agregado natural (areia)

com concretos com substituição de 5, 10 e 15% da areia por resíduo de vidro. Seus resultados apresentaram concretos com aplicação estrutural para relação água/cimento 0,50 independentemente da porcentagem adotada.

López, Azevedo e Barbosa Neto (2005) também estudaram a substituição da areia por vidro moído em concretos. A pesquisa analisou a influência da granulometria do resíduo de vidro e de suas porcentagens em substituição a areia na resistência dos concretos. Os resultados indicaram a granulometria faixa de 0,15 – 0,30 mm com a mais adequada para o aumento da resistência. Segundo os autores (2005) essa granulometria poderia melhorar o preenchimento de vazios pelo vidro fino, melhorando o empacotamento das partículas. Com essa granulometria em substituição de 5% da areia resultou em um aumento de 21% na resistência a compressão do concreto quando comparado ao concreto de referência (sem adição de vidro).

A hidratação do cimento Portland evolui com o tempo, tendo aos 28 dias de cura cerca de 70-80% de grau de hidratação e praticamente se completando aos 365 dias. Mas o processo de hidratação depende do tipo e da finura do cimento, da relação entre água e cimento, da temperatura de cura e da presença de aditivos químicos e minerais. Basicamente, a reação de hidratação consiste na formação do silicato de cálcio hidratado, aluminato de cálcio hidratado, etringita, monosulfaluminato de cálcio hidratado e do hidróxido de cálcio, a partir da reação dos compostos do cimento (C2S, C3S, C3A e C4AF) com a água. Quando adições minerais de atividade pozolânica, são incorporados à matriz de cimento, eles podem reagir com o hidróxido de cálcio resultante da hidratação do cimento, formando uma quantidade de produto hidratado adicional na matriz de cimento hidratada. A quantidade deste pode reduzir a porosidade da matriz, a porosidade da zona de transição dos concretos e a permeabilidade do material cimentício, causando um incremento em sua durabilidade e resistência (GONÇALVES, TOLEDO FILHO, FAIRBAIRN; 2006).

Deve-se ter o cuidado com a adição de água na mistura contendo resíduo de vidro para não modificar, de forma negativa as propriedades mecânicas do concreto. Ocorrências como essa são perfeitamente factíveis de acontecerem, pois o resíduo de vidro pode ter uma maior área superficial dependendo da sua granulometria, com isso, a modificação da relação água-cimento na mistura do concreto pode prejudicar a sua resistência à compressão. Trata-se, portanto, da lei de Abrms.

2.4 PROCESSO DE LAPIDAÇÃO DAS CHAPAS DE VIDRO

O resíduo de vidro empregado nesta pesquisa é oriundo processo de lapidação do vidro sodo-cálcico ou vidro plano. As lâminas de vidro ao chegarem na Industrial são armazenadas no setor de estoque, como mostra a figura 17.

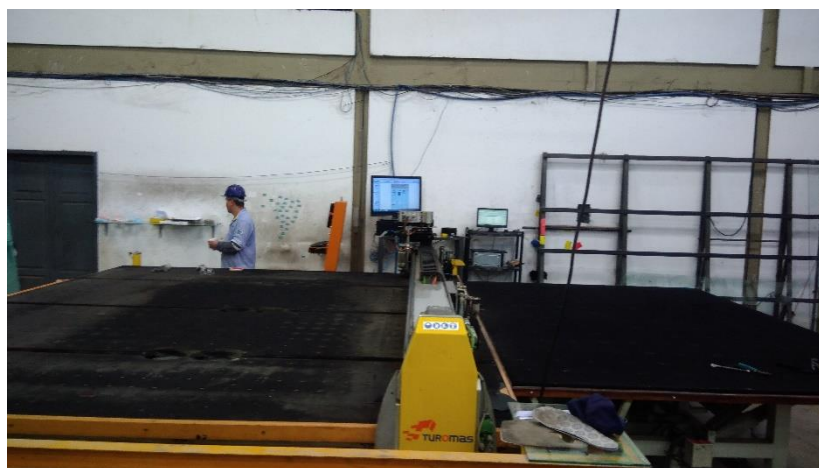
Figura 17 - Armazenagem das chapas de vidro



Fonte: Dado da pesquisa, 2019.

O processo de corte do vidro ocorre em uma bancada onde o vidro é medido e cortado com o auxílio de uma mesa de corte computadorizada mostra na figura 18.

Figura 18 - Mesa de corte computadorizada



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Durante o processo de corte os cantos ou arestas das lâminas de vidro tornam-se cortantes (figura 19). Para eliminar estas imperfeições e tornar o manuseio mais

seguro, o vidro passa por um processo lapidação, onde discos ou rebolos diamantados desbastam as arestas laterais e dão o polimento. Em cada disco há um esguicho de água que ameniza a temperatura e o desgaste gerado pelo atrito com a chapa de vidro (figura 20).

A água utilizada na lapidação, se mistura ao pó de vidro que é liberado durante o processo, essa água é coletada por tubos e levada a um câmaras de decantação onde fica armazenada, como mostra a figura 21. Nestas câmaras o efeito da gravidade promove a decantação do pó de vidro que fica armazenado no fundo do reservatório.

Figura 19 - Detalhe da aresta cortante da chapa de vidro após corte da peça



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 20 - Detalhe do processo de lapidação com discos de desbaste e água



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 21 - Resíduo de vidro com água sendo recolhido para decantação



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental buscou estudar as propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro em diferentes percentuais. Para tanto foram definidas variáveis independentes, variáveis de controle e variáveis de resposta.

As variáveis independentes adotadas neste estudo foram:

- Tipo de cimento (CP II F40);
- Tipo dos agregados;
- Relação água/aglomerante ($a/agl = 0,59$);
- Umidade da areia;
- Procedimento de mistura;
- Procedimento de moldagem dos corpos de prova;
- Procedimento de cura.

Já como variáveis de controle foram utilizadas:

- Substituição do cimento por resíduos de vidro moído (0%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5%);
- Idade de realização de cada ensaio 7, 28 e 56 dias.

E como variáveis de resposta foram:

- Índice de consistência;
- Massa específica aparente no estado frescos;
- Resistência à compressão (mínimo de 35Mpa);
- Resistência à tração por compressão diametral.

O programa experimental foi dividido em duas etapas, a primeira etapa foi a caracterização dos materiais empregados na confecção dos concretos e a segunda etapa foi a preparação e caracterização dos concretos.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS E AGLOMERANTES

O agregado miúdo empregado no programa experimental foi uma areia quartzosa de origem natural extraída do rio Poty na região de Teresina/PI. Esse agregado foi seco ao ar livre e peneirado removendo qualquer impureza que pudesse influenciar nas propriedades do concreto. Sua caracterização realizada no laboratório de controle tecnológico de concretos de uma empresa de em Teresina-PI segundo a NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003). A distribuição granulométrica da areia atendeu ao lime de zona ótima estabelecidos pela NBR 7211(ABNT, 2009) com módulo de finura de 2,21 como pode ser observado na tabela 4.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica da areia

Peneira # (mm)	% Retida Acumulada
4,75	0,0
2,36	2,0
1,18	5,0
0,60	23,0
0,30	92,0
0,15	99,0
Fundo	100,0

Dimensão máxima característica: $D_{\text{máx}} = 1,2 \text{ mm}$ (NBR 7211)

Módulo de finura: $MF = 2,21$ (NBR 7211)

Classificação NBR 7211: zona ótima inferior

Fonte: Dado da pesquisa, 2019.

O agregado graúdo empregado no programa experimental foi diabásio britado fornecido por uma empresa em Teresina-PI. O agregado foi seco ao ar livre e sua caracterização realizada no laboratório de controle tecnológico de concretos de uma empresa em Teresina-PI, segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). A composição granulométrica da brita atendeu ao lime de zona 4,75/12,5 estabelecidos pela NBR 7211(ABNT, 2009) com dimensão máxima característica 12,5 mm e módulo de finura 5,84 como mostra a tabela 5.

Tabela 4 - Distribuição granulométrica da brita

Peneira # (mm)	% Retida Acumulada
12,5	0,0
9,5	11,0
6,3	59,0
4,75	84,0
2,36	98,0
Fundo	100,0

Dimensão máxima característica: $D_{m\acute{a}x} = 12,5$ mm (NBR 7211)

Módulo de finura: MF = 5,85 (NBR 7211)

Classificação NBR 7211: zona 4,75/12,5

Fonte: Dado da pesquisa, 2019.

A água utilizada foi fornecida pela concessionária de serviço local Águas de Teresina. O cimento utilizado foi o Portland CP II F 40 da marca Poty, fabricado por Votorantim cimentos, que possui a secagem rápida e alta resistência. Todo o cimento utilizado pertenceu ao mesmo lote, e suas características físicas, químicas e mecânicas fornecidas pelo fabricante são apresentadas na tabela 6.

Tabela 5 - Caracterização física e química do cimento CP II F 40

Propriedades			Teores	Limites Máx.de Norma
Químicas	Teores (%)	PF	4,52	$\leq 12,5$
		Na ₂ O	0,12	N/A
		K ₂ O	1,21	N/A
		MgO	3,22	N/A
		SO ₃	4,19	$\leq 4,5$
		RI	1,81	$\leq 7,5$
Físicas e mecânicas	Finura (%)	#200	0,3	12
		#325	1,8	N/A
	Blaine (cm ² /g)		4649	≥ 2600
	Água de consist.(%)		29,5	N/A
	Tempo pega	Início (min)	147	≥ 60
		Fim (min)	197	≤ 600
	Resistência à Compressão (MPa)	1 Dia	25,3	N/A
		3 Dias	36	$\geq 10,0$
		7 Dias	41,5	$\geq 20,0$
		28 Dias	48,4	$\geq 40,0; \leq 49,0$

Fonte: Dados cedidos por Votorantim Cimentos.

3.3 RESÍDUO DE VIDRO: PREPARO E CARACTERIZAÇÃO.

O resíduo de vidro oriundo da etapa de polimento e desbaste foi coletado em uma empresa e seco em área coberta e ventilada. Em um laboratório de controle tecnológico de concretos, o resíduo foi destorroado e levado a estufa a 105°C por 24h, em seguida o material foi ensacado e lacrado para transporte.

Com o material destorroado e seco foi realizado o processo de moagem em um moinho de bolas durante 12 horas no laboratório do programa de pós-graduação em engenharia de materiais do IFPI como mostra a figura 22. Este tempo foi adotado após testes e conforme observado por Sousa Neto (2014) para que 90% das partículas do resíduo de vidro ficassem menores que 75 μm e o resíduo na peneira 45 μm ficasse entre 10% e 15%. Durante as moagens as esferas de porcelana ocuparam metade do volume do jarro de moagem e o espaço entre elas foi preenchido com 500g de resíduo de vidro.

Figura 22 - Moinho de bolas utilizado para moer o resíduo de vidro



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

A verificação da finura do resíduo vidro moído foi realizada de acordo com a NBR 11579 – Cimento Portland – Determinação da Finura por meio da peneira 75 μm (nº 200) - Método de ensaio (ABNT, 2012) e NBR 15894-3 – Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassas e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm (ABNT, 2010)

A análise química do resíduo foi realizada com a técnica de fluorescência de raios-X (FRX) utilizando o equipamento Epsilon 3 XL da marca PANalytical (figura 23) presente no laboratório do programa de pós-graduação em engenharia de materiais do IFPI.

Figura 23 - Espectrômetro de fluorescência de raio X



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

A técnica de difração de raios-X (DRX) para a determinação da cristalinidade ou não cristalinidade do material foi realizada utilizando um equipamento da marca PANalytical (Figura 24) presente no laboratório do programa de pós-graduação em engenharia de materiais do IFPI.

Figura 24 - Difratorômetro de raio X



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

3.4 ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO

Para verificação da atividade pozolânica do resíduo foi realizado o ensaio segundo a NBR 5752 (2014) Material pozolânico – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. O ensaio consiste em romper doze corpos de prova cilíndricos de (50x100) mm preparados com argamassas com duas dosagens diferentes, seis corpos de prova com argamassa A com contendo quantidades predeterminadas de cimento areia normal e água, e seis corpos de prova com argamassa B contendo 25% em massa de material pozolânico, em substituição a porcentagem de cimento, além de areia e água também em quantidades predeterminadas.

O índice de desempenho com o Cimento Portland é determinado pela equação 4:

$$I_{\text{cimento}} = \frac{f_{cB}}{f_{cA}} * 100 \quad (\text{Eq: 4})$$

Onde I_{cimento} é o índice de desempenho com o cimento Portland aos 28 dias expresso em (%), f_{cB} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com argamassa B e f_{cA} é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com argamassa A. O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle foi comparado com os requisitos estabelecidos pela NBR 12653 (2014). Cabe ressaltar que o ensaio foi realizado com o cimento Portland CP II F 40, o mesmo utilizado na confecção dos concretos. A argamassadeira utilizada no preparo das argamassas A e B está apresentada na figura 25.

Figura 25 - Argamassadeira



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

3.5 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS

O estudo de dosagem foi baseado no método experimental do Instituto de Pesquisa Tecnológica – IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1992) para definir o traço que resultasse na resistência de 35MPa.

A quantidade de material necessária foi levantada considerando a capacidade da betoneira disponível e a quantidade de corpos de prova necessários, observando-se também as condições de trabalhabilidade. Ao fim do planejamento foi definido o quantitativo de 19 corpos de prova por betonada.

Deste modo foram necessárias 5 betonadas, 1 para cada traço, contendo 37,35Kg de agregado graúdo, 28,05Kg de agregado miúdo, 15,00Kg de aglomerante (cimento e resíduo de vidro moído) e 8,85Kg de água.

Foram preparados concretos com 0%, 5%, 7,5%, 10% e 12,5% de substituição do cimento pelo resíduo de vidro moído como mostram as tabelas 7 e 8. Nos traços em que houve substituição de parte cimento por resíduo de vidro moído, o resíduo foi misturado ao cimento e a mistura foi homogeneizada previamente.

Tabela 6 - Quantidade de materiais por betonada, teor de substituição, relação água/aglomerante e água/ cimento

Teor de substituição (%)	Quantidade de materiais por betonada (Kg)					Relação água/aglomerante	Relação água/cimento
	Cimento	RVM	Areia	Brita	Água		
0	15,000	0					0,59
5	14,250	0,75					0,62
7,5	13,875	1,125	28,1	37	8,85	0,59	0,64
10	13,500	1,5					0,66
12,5	13,125	1,875					0,67

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Tabela 7 - Proporção dos materiais por betonada e teor de substituição

Teor de substituição (%)	Proporção dos materiais por betonada (cimento:resíduo:areia:brita:água)
0	15:0:28,05:37,35:8,85
5	14,25:0,75:28,05:37,35:8,85
7,5	13,875:1,125:28,05:37,35:8,85
10	13,50:1,50:28,05:37,35:8,85
12,5	13,125:1,875:28,05:37,35:8,85

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

A preparação do concreto foi executada de acordo com as especificações da NBR 12821 (2009), com uma betoneira de eixo inclinado da marca Menegotti com capacidade de 120l como mostra a figura 26. A moldagem e cura dos corpos-de-prova seguiu as recomendações normativas da ABNT NBR 5738 (2015).

Figura 26 - Betoneira utilizada no preparo dos concretos



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

3.5.1 Ensaios no concreto no estado fresco

Para a caracterização do concreto no estado fresco foram realizados ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone (figura 27) conforme orienta a NBR NM 67 (ABNT, 1998) e a consistência adotada foi classificada conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015). Também foi realizado o ensaio de determinação da massa específica de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008).

Figura 27 - Aparência do concreto no momento da aferição da consistência

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

3.5.2 Ensaios no concreto no estado endurecido

No estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência a compressão axial (f_c) NBR 5739 e resistência a tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) NBR 7222 (2011) em corpos de prova cilíndricos de dimensões (10x20) cm. Também foi calculada a massa específica aparente no estado endurecido dividindo a massa dos corpos de prova pelo seu volume. Ao todo 90 corpos de prova foram rompidos após passarem por um processo de cura durante 7, 28 e 56 dias como mostra a tabela 9.

Tabela 8 - Quantidade de corpos de prova analisados

	% de substituição do cimento por pó de vidro														
%	0,0%			5,0%			7,5%			10,0%			12,5%		
Tempo	7	28	56	7	28	56	7	28	56	7	28	56	7	28	56
fc, E	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
fct,sp	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Subtotal	18			18			18			18			18		
Total	90														

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 28 - Prensa hidráulica utilizada nos ensaios de compressão



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Os ensaios para a determinação da resistência a compressão axial e resistência a flexão por compressão diametral foram realizados em uma prensa hidráulica da marca Pavitest com mostrador digital e capacidade de 100 toneladas presente no laboratório de controle tecnológico de concretos de uma empresa em Teresina-PI conforme figura 28 acima.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO

A verificação da finura do resíduo vidro moído realizada por meio da peneira 75 μm (nº 200) mostrou um índice de finura de 5,08%. Já a determinação da finura por meio da peneira 45 μm apresentou o valor de 9,32%, atendendo a exigência da norma 12653 (ABNT, 2014) exige que a porcentagem retida na peneira de malha 325 seja de no máximo 20%. Estes resultados indicam que as partículas do resíduo estão maiores que as do cimento o que pode contribuir para um melhor empacotamento das partículas.

A análise química do resíduo realizada com a técnica de fluorescência de raios-X (FRX) pode ser vista na tabela 10. Esses dados corroboram os valores encontrados por outros pesquisadores como pode ser observado na tabela 11.

A composição química do material apresentou predominância de sílica SiO_2 com 72%. O material pode ser classificado como vidro de cal soda ou sodo-cálcico devido a presença de óxido de cálcio CaO e óxido de sódio Na_2O com 9 e 13,8% respectivamente o que segundo Miao (2011) apud Guignone (2017) assemelham-se a valores típicos de desse tipo de vidro que são de aproximadamente 70% para a sílica, 12 a 17% para Na_2O e 10% para CaO . O total de óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) 72,90% atendeu ao requisito mínimo de 70% estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), já o valor de óxido de sódio (Na_2O) 13,8% superou o valor máximo estabelecido pela norma (2014) que é de 1,5%.

Tabela 9 - Composição química do vidro obtidos com FRX

Compostos	Concentração
Sílica (SiO_2)	72,00%
Alumina (Al_2O_3)	0,70%
Óxido de ferro (Fe_2O_3)	0,20%
Óxido de Cálcio (CaO)	9,00%
Óxido de Magnésio (MgO)	4,00%
Óxido de Sódio (Na_2O)	13,80%
Óxido de Potássio (K_2O)	0,30%

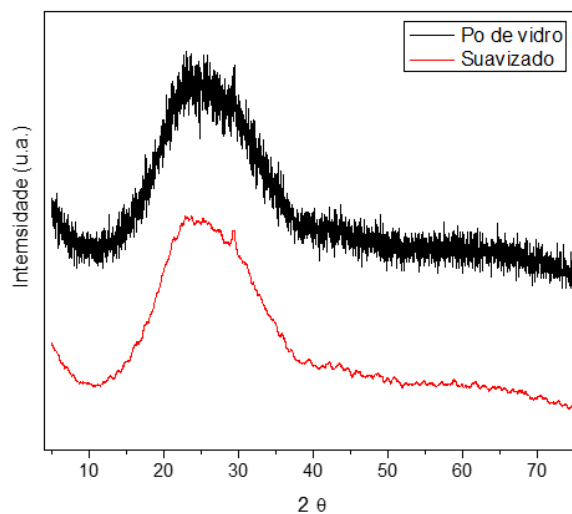
Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Tabela 10 - Análises químicas

Pesquisas	Concentração dos compostos							
	Sílica (SiO ₂)	Alumina (Al ₂ O ₃)	Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	Óxido de Cálcio (CaO)	Óxido de Magnésio (MgO)	Óxido de Sódio (Na ₂ O)	Óxido de Potássio (K ₂ O)	Trióxido de enxofre SO ₃
Sousa Neto (2014)	73,49%	1,44%	0,37%	16,10%			0,16%	2,45%
Paiva (2009)	74,16%	1,60%	0,45%	12,46%	3,51%		0,26%	
Guignone (2017)	64,77%	2,81%	0,44%	6,92%	4,49%	19,36%	0,11%	
Antônio (2012)	64,29%	4,25%	0,38%	13,64%	4,16%	11,49%	0,53%	0,38%
Simões (2013)	56,77%	6,07%	0,29%	5,64%	3,67%	15,41%	0,16%	0,16%
Nassar e Soroushian (2012)	68,00%	7,00%	<1%	11,00%	1,00%	12,00%	<1%	
Matos e Sousa- Coutinho (2012)	70,00%	1,20%	0,65%	8,70%	3,70%	16,00%	0,35%	
Esta pesquisa	72,00%	0,70%	0,20%	9,00%	4,00%	13,80%	0,30%	

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

O resultado da análise por difração de raio X (DRX) visto na figura 29 mostra um comportamento característico de sílica amorfa entre os ângulos de 15 a 35, o que indica que o material tem um potencial efeito pozolânico.

Figura 29 - Difratoograma de raio X

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

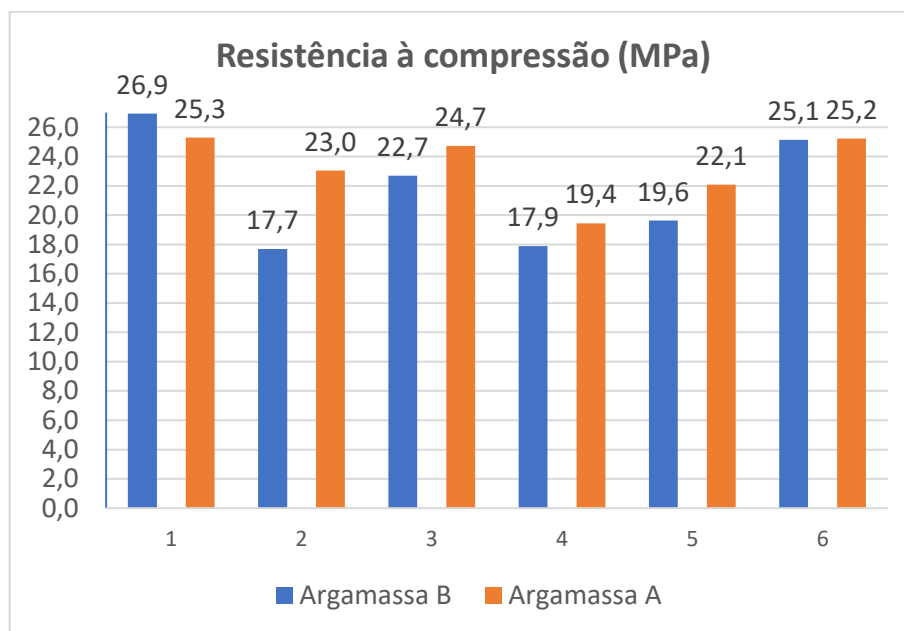
4.2 ATIVIDADE POZOLÂNICA DO RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO

Os valores de resistência a compressão para as argamassas A e B e o índice de atividade pozolânica com cimento Portland são apresentados na tabela 12 e figura 30, respectivamente.

Tabela 11 - Resistência à compressão, índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias

Argamassas	Resistência média (Mpa)	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)	Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias (%)
A	23,3	2,3	10%	referência
B	21,7	3,9	18%	93% > 90

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 30 - Resistência à compressão das argamassas A e B

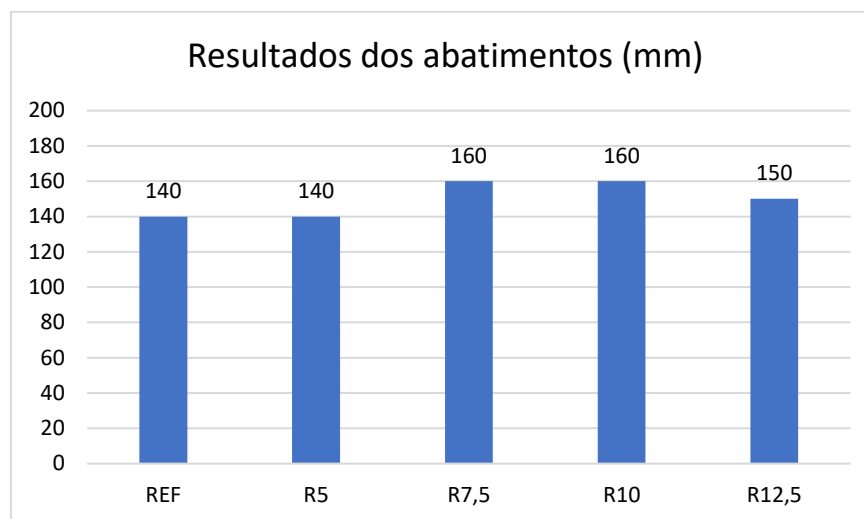
Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Os resultados confirmam a pozolânicidade do material pois o mesmo apresentou um Índice de atividade pozolânica com cimento Portland em relação ao controle de 93%, valor maior que os 90% estabelecido pela NBR 12653 (2014). Indicando que a sílica amorfa presente no resíduo de vidro moído reagiu com hidróxido de cálcio (proveniente da hidratação do cimento) formando silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) que são compostos mais estáveis e resistentes.

4.3 ANÁLISE DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS CONCRETOS

4.3.1 Avaliação das propriedades do concreto no estado fresco

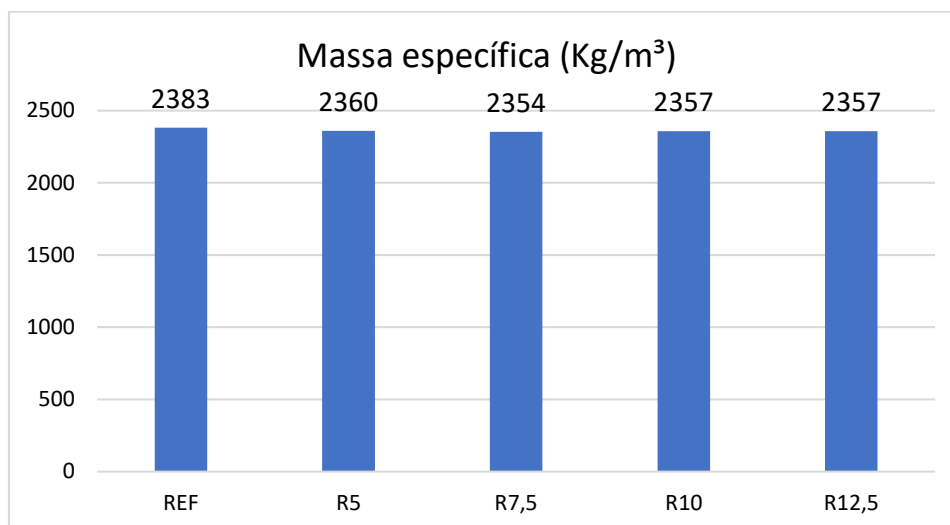
Os resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco são apresentados na figura 31.

Figura 31 - Resultados dos ensaios de abatimentos de tronco de cone

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Observa-se que os concretos apresentam abatimento variando entre 150 ± 10 mm, com uma boa trabalhabilidade, todos com classe de consistência S100 segundo a NBR 8953 (2015). A trabalhabilidade foi ligeiramente alterada nos concretos com adição de 7,5, 10 e 12,5%. A relação água cimento aumenta conforme parte do cimento é substituída pelo resíduo, outro quesito, é que o resíduo tem granulometria mais grosseira que a do cimento, portanto menor superfície específica e menor consumo de água, o que segundo Neville e Brooks (2013) afeta a trabalhabilidade já que a mistura requerer menos água do amassamento.

Os valores das massas específicas determinadas de acordo com a NBR 9833 (ABNT, 2008) estão expressos na figura 32 e tem média de 2362 Kg/m^3 e coeficiente de variação de apenas 0,5%. Ouve uma pequena redução nas massas específicas o que também foi observado nas pesquisas de Nassar e Soroushian (2012) e Antônio (2012), de maneira geral o resíduo de vidro, nos percentuais adotados, não apresentou variação significativa na massa específica dos concretos.

Figura 32 - Resultados da massa específica no estado fresco

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

4.3.2 Avaliação das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial são apresentados a seguir na tabela 13, nas figuras 33 e 34.

Tabela 12 - Resultados dos valores médios de resistência à compressão axial

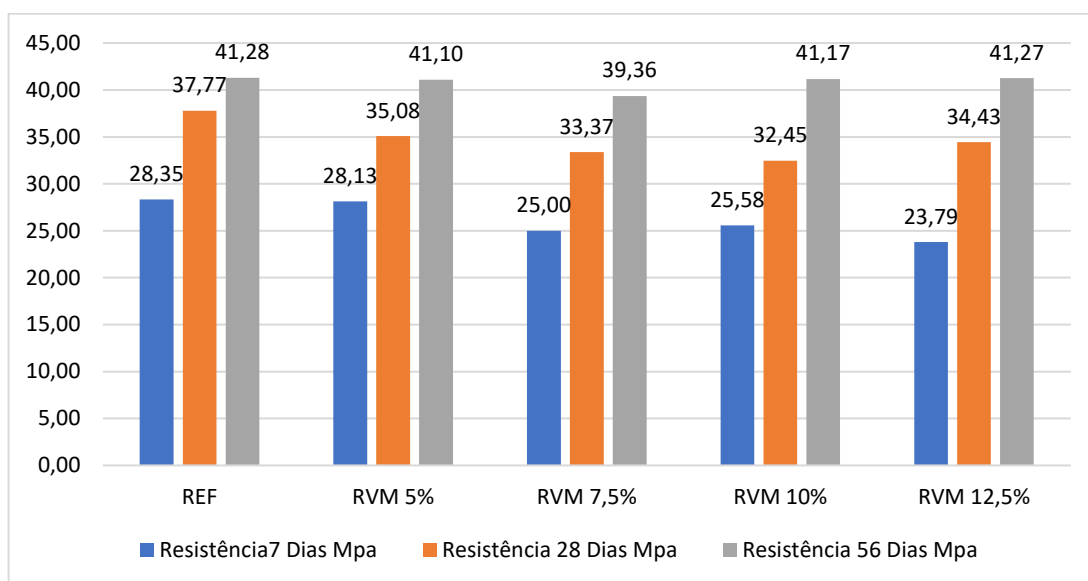
Traço	7 Dias			28 Dias			56 Dias		
	Fc	Se	CV _e	Fc	Se	CV _e	Fc	Se	CV _e
REF	28,4	0,91	3,20%	37,8	1,04	2,76%	41,3	0,13	0,32%
RVM 5%	28,1	1,50	5,33%	35,1	0,59	1,67%	41,1	1,34	3,26%
RVM 7,5%	24,8	0,69	2,78%	33,4	0,35	1,06%	39,4	0,40	1,01%
RVM 10%	25,6	0,69	2,71%	32,5	1,26	3,89%	41,2	1,28	3,11%
RVM 12,5%	23,8	0,32	1,34%	34,4	0,47	1,37%	41,4	0,82	1,97%

Notas: Fc - Resistência à compressão (MPa).

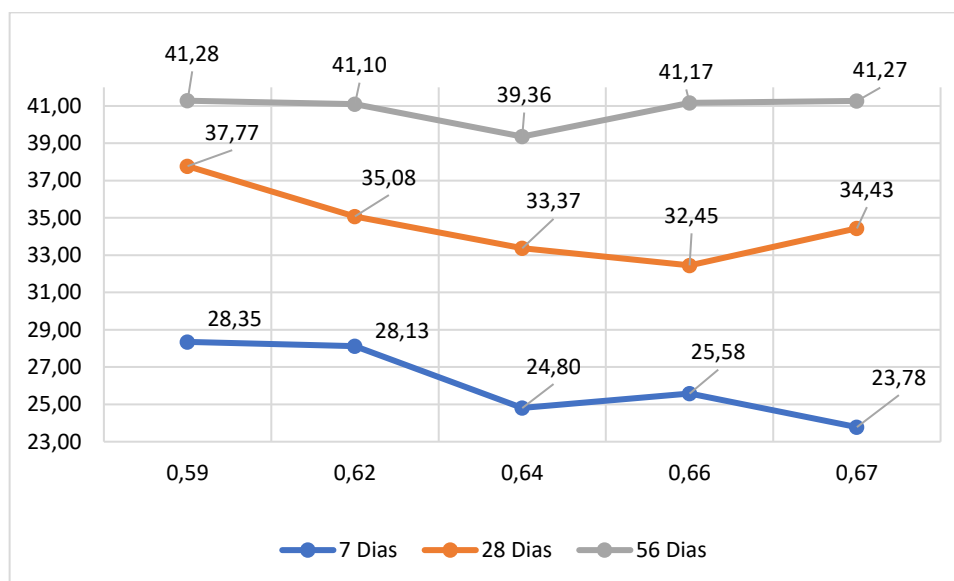
Se - Desvio Padrão conforme NBR 5739.

CV_e - Coeficiente de variação conforme NBR 5739

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 33 - Valores médios de Resistência à compressão axial

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 34 - Resistência à compressão axial em relação a idade e fator água/cimento

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Observa-se que em todas as substituições adotadas e em quaisquer idades os resultados foram inferiores aos do concreto de referência. Cabe ressaltar que, nas substituições, os concretos obtiveram maior fator água/cimento e menor quantidade de cimento por traço o que pode provocar o enfraquecimento da matriz cimentícia em função do aumento da porosidade contribuindo para a redução da resistência como previsto pela lei de Abrams da relação água/cimento.

Houve o aumento da resistência a compressão axial com aumento das idades em todos os percentuais de substituição estudados. O crescimento de resistência em todas as substituições e em todas as idades, também demonstra segundo Paiva (2009) que não houve fragilização com o passar do tempo devido a reações álcali-sílica.

Os concretos com substituições ganharam menos resistência que o de referência nos primeiros 7 dias, isso pode ser explicado por eles possuírem menor quantidade de cimento. Os dados demonstram que as substituições não retardam o ganho de resistência à compressão axial por hidratação do cimento nos primeiros 7 dias visto que nessas idades todos os traços apresentam cerca de 70% da resistência aos 28 dias. Em todas as substituições, embora as resistências não superem o concreto de referência, os valores apresentados são acima de 20MPa, o que pode ser explicado pelo tipo de cimento adotado que possui resistências iniciais elevadas.

Observa-se também que todos os concretos superaram a resistência de 30MPa aos 28 dias podendo ser considerados concretos estruturais já que a NBR 6118 (2014) considera estruturais os concretos acima de 20 MPa. A apenas o RVM5 atingiu os 35 MPa aos 28 dias, valor estipulado inicialmente no programa experimental; no entanto, ocorreu um crescimento da resistência à compressão axial com o avanço das idades, de tal maneira que aos 56 dias todos os corpos-de-prova atingiram uma resistência superior aos 35 MPa. Isso corrobora o aumento de resistência em idades avançadas observado nas pesquisas de Guignone (2017), Simões (2013), Nassar e Soroushian (2012), que pode ser explicado pelo comportamento pozolânico do material apresentado na sua caracterização.

Dentre os concretos com substituição, a menor resistência à compressão aos 56 dias foi de 39,36 Mpa do RVM7,5 cerca de 95,4% da resistência do concreto de referência. Os outros concretos com substituição obtiveram valores de resistência a compressão muito próximos ao valor do concreto de referência obtendo em média 99,75% da sua resistência.

Como pode ser observado na tabela 14 o RVM12,5, entre todos os concretos estudados, apresentou maior ganho de resistência em idades entre os 7 e 28 dias, maior até mesmo que concreto de referência, o que indica que as reações pozolânicas podem ter iniciado ainda nessas idades já que grande parte hidróxido de cálcio necessário a reação foi formado nos primeiros 7 dias. Já em idades mais tardias entre

os 28 e 56 dias de quem apresentou maior ganho de resistência foi o RVM10.

Tabela 13 - Ganho de resistência à compressão axial entre idades: 7, 28 e 56 dias

Traço	Resistência a compressão axial (MPa)		
	Variação 7-28 dias	Variação 28-56 dias	Variação 7-56 dias
REF	9,42	3,51	12,93
RVM 5%	6,95	6,03	12,98
RVM 7,5%	8,37	5,99	14,36
RVM 10%	6,88	8,72	15,60
RVM 12,5%	10,64	6,83	17,48

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

O RVM12,5 apresentou praticamente a mesma resistência à compressão que o concreto de referência e obteve o maior ganho de resistência entre os 7 e os 56 dias como pode ser observado na tabela 14, apesar da diminuição da quantidade de cimento em 12,5% e aumento o fator água cimento para 0,67.

Os dados da tabela 14 demonstram que entre os 28 e os 56 dias o ganho de resistência à compressão dos concretos com substituição é em média 50% maior que o concreto de referência, o que mais uma vez pode ser explicado pelo comportamento pozolânico do material apresentado na sua caracterização.

Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral são apresentados a seguir na tabela 15, na figura 35.

Tabela 14 - Resultados dos valores médios de resistência à tração por compressão diametral

Traço	7 Dias			28 Dias			56 Dias		
	Fct,sp	σ	CV	Fct,sp	σ	CV	Fct,sp	σ	CV
REF	2,37	0,13	5,45%	2,89	0,22	7,50%	2,78	0,12	4,41%
RVM 5%	2,00	0,27	13,64%	2,69	0,16	6,04%	3,00	0,04	1,33%
RVM 7,5%	1,85	0,28	14,87%	3,13	0,23	7,26%	2,84	0,06	2,22%
RVM 10%	2,33	0,03	1,42%	2,76	0,26	9,31%	2,96	0,13	4,37%
RVM 12,5%	2,02	0,25	12,21%	2,95	0,25	8,53%	2,95	0,07	2,41%

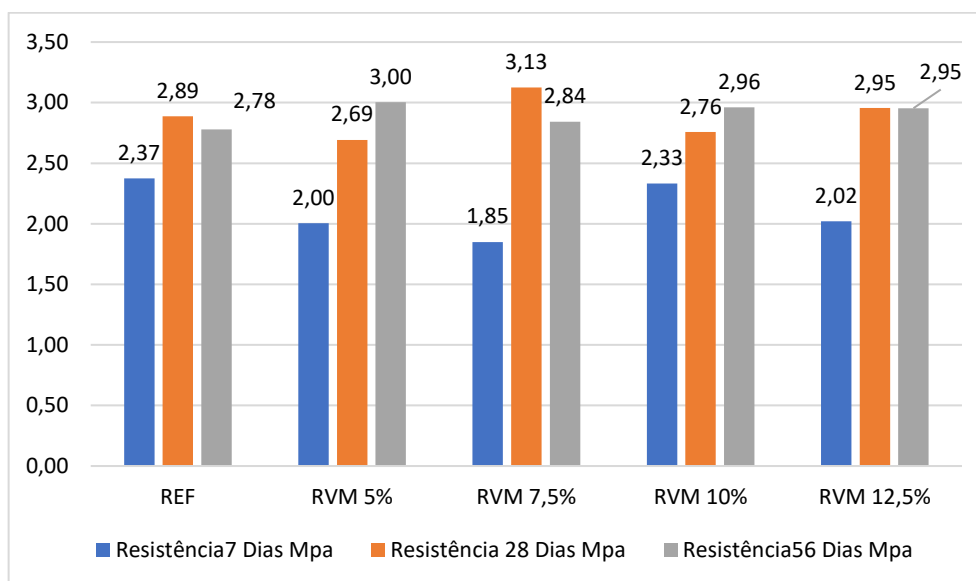
Notas: Fct,sp - Resistência à tração por compressão (MPa).

σ - Desvio Padrão.

CV - Coeficiente de variação.

Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Figura 35 - Valores médios de resistência à tração por compressão diametral



Fonte: Dado da pesquisa, 2019

Os dados mostram que nos primeiros 7 dias idades em todas as substituições adotadas os resultados foram inferiores aos do concreto de referência. Cabe novamente ressaltar a influência dos diferentes fatores água/cimento que promovem menores resistências nos concretos com substituição por terem proporcionalmente menos cimento.

Houve o aumento da resistência à tração por compressão diametral com aumento das idades em todos os percentuais de substituição estudados. O crescimento de resistência em todas as substituições e em todas as idades, corrobora com os dados obtidos para a resistência a compressão axial e indicando que não houve fragilização devido a reações álcali-sílica.

É possível observar que em todos os traços estudados houveram ganhos significativos de resistência à tração por compressão diametral entre os 7 e os 28 dias de idade, sobretudo para o RVM7,5 que ganhou quase 60% de resistência nesse intervalo de tempo. O mesmo não pode ser dito para o intervalo entre 28 e 56 dias onde não houveram ganhos significativos de resistência e no caso dos concretos REF e RVM7,5 houveram até reduções da resistência o que é um comportamento inesperado que pode ser explicado pelos grandes coeficientes de variação apresentados nos resultados dos 7 e 28 dias de idades devido ao pequeno número de corpos de prova ensaiados, o que torna a amostra passível a variações.

A partir dos dados apresentados é possível inferir que as substituições tendem a influenciar a resistência à tração por compressão diametral, já que aos 28 e 56 dias de idade os concretos com substituição apresentaram valores de resistência próximo e até superiores aos do concreto de referência, mesmo possuindo maior fator água/cimento e menos cimento.

Aos 56 dias de idade todas as substituições superaram ligeiramente os valores de resistência à tração por compressão diametral do concreto de referência, comportamento observado por Simões (2013) e Antônio (2012) em idades de 28 dias.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo final são apresentadas as conclusões inferidas a partir dos resultados e discussões apresentadas no capítulo anterior, além de sugestões para estudos futuros nesta mesma linha de pesquisas.

A partir deste estudo, constatou-se que o resíduo de vidro moído em questão, na granulometria e nos percentuais estudados, pode ser aplicado na produção de concretos verdes estruturais em substituições parciais ao cimento, reduzindo assim o consumo de cimento, promovendo menor consumo de recursos naturais e dando um uso sustentável a um rejeito da indústria.

A caracterização do resíduo de vidro moído permite concluir o material é constituído em sua maior parte por sílica, cerca de 72%, esta sílica está em estado predominantemente amorfo o que torna a sílica reativa e promove a reatividade pozolânica que foi confirmada pelo índice de atividade pozolânica com cimento de 93% atendendo ao requisito da NBR 12653 (2014).

Os resultados dos ensaios realizados com o concreto no estado fresco permitem inferir que o resíduo de vidro moído, na granulometria e nos percentuais estudados, não influenciou de maneira significativa a trabalhabilidade e a massa específica no estado fresco, embora a trabalhabilidade tenha sido ligeiramente aumentada nos concretos com maiores substituições.

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial possibilitam concluir que conforme aumentam os percentuais de substituição do cimento pelo resíduo de vidro moído, os concretos apresentam uma redução nas resistências à compressão axial em idades iniciais.

As substituições não retardam diretamente o ganho de resistência à compressão axial por hidratação do cimento nos primeiros 7 dias visto que nessas idades todos os traços apresentam cerca de 70% da resistência aos 28 dias.

Em idades de 28 dias os concretos com substituições permeassem com resistências a compressão axial inferiores ao concreto de referência, no entanto, entre os 28 e os 56 dias de idade os concretos com substituições tem um ganho de resistência em médio 50% maior que o concreto de referência, evidenciando a formação de mais silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) por reações pozolânicas do

hidróxido de cálcio produzido em idades iniciais com a sílica reativa presente no resíduo de vidro moído.

As reações pozolânicas que promovem maiores ganhos de resistência em idades tardias dos concretos (entre 28 e 56 dias) tem início antes dos 28 dias. É possível obter concretos estruturais com as substituições estudadas uma vez que todos os concretos com substituições superaram a resistência de 30MPa aos 28.

O resíduo estudado não promoveu reações álcali-sílica visto que não houve fragilização com o avanço das idades, pelo contrário houve crescimentos de resistência em todas as substituições e em todas as idades.

A substituição de 12,5% de cimento por resíduo de vidro moído, dentre as estudadas, é a mais eficiente pois é a que promove maior ganho de resistência em idades de 56 dias, é também a que consome menos cimento.

Devido a limitações de tempo e métodos alguns aspectos do comportamento de concretos produzidos com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro moído não puderam ser estudados, deste modo a seguir são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que contribuam para o melhor entendimento do comportamento deste material:

- Estudar o desempenho das propriedades físicas e mecânicas de concretos com percentuais de substituição parcial do cimento por resíduos de vidro moído superiores a 12,5% variando de 2,5% em 2,5%.
- Estudar o desempenho de durabilidade e resistentes a ambientes de agressividade severa dos concretos com resíduos de vidro moído como substituição parcial ao cimento.
- Estudar a resistência à carbonatação de concretos com resíduos de vidro moídos como substituição parcial ao cimento.
- Estudar a influência da substituição parcial de cimento por resíduo de vidro moído na reologia, tempo de pega enlaçamento de concretos.
- Estudar o comportamento de concretos produzidos com substituição parcial de cimento por resíduo de vidro sem moagem.

REFERÊNCIAS

ABALAKA, A. E. Strength and some durability properties of concrete containing rice husk ash produced in a charcoal incinerator at low specific surface. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 4, p. 287-293, 2013.

ABDALLAH, S.; FAN, M. Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. **International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)**, v. 2, n. 6, p. 11-17, 2014.

ABIVIDRO - **Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro**. São Paulo, SP, 2018. Disponível em: <https://www.abividro.org.br>. Acesso em: 21 setembro. 2018.

ABRELPE. **Panorama de resíduos sólidos**, 2018.

ADAWAY, M.; WANG, Y. Vidro reciclado como substituto parcial do agregado fino no concreto estrutural - Efeitos na resistência à compressão. **Revista Eletrônica de Engenharia Estrutural**. v. 14, n. 1, p. 116-122, 2015.

AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 263-272, 2016.

AITCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. Tradução: SERRA, G. G. São Paulo: Pini, 2000.

ALOMAYRI, T. The microstructural and mechanical properties of geopolymer composites containing glass microfibres. **Ceramics International**, v. 43, n. 5, p. 4576-4582, 2017.

ALVES, O.L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I.O. Vidros. **Cadernos Temáticos – Química Nova na Escola**. Edição Especial, 2001.

ANTÔNIO, A. P. **Potencialidades do aproveitamento do resíduo de estação de tratamento de efluentes do processo de lapidação do vidro sodo – cálcico na produção de concretos**. 2012.162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7211: Agregados para concreto** — Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

_____. **ABNT NBR 11579: Cimento Portland** — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2012.

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

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

_____. **ABNT NBR 5739: Concreto** — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **ABNT NBR 5738: Concreto** — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **ABNT NBR 12655: Concreto de cimento Portland** — Preparo, controle, recebimento e aceitação — Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

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

_____. **ABNT NBR 9833: Concreto fresco** — Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. **ABNT NBR 5752: Materiais pozolânicos** — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 12653: Materiais pozolânicos** — Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **ABNT NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta**. Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **ABNT NBR 12821: Preparação do concreto em laboratório** — Procedimento. Rio de Janeiro, 2009.

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

BARBHUIYA, S.; MUKHERJEE, S.; NIKRAZ, H. Effects of nano-Al₂O₃ on early-age microstructural properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 189-193, 2014.

BENTZ, D.P.; FERRARIS, C.F.; SNYDER, K.A. **Best practices guide for high-volume fly ash concretes**: Assuring properties and performance, 2013.

BOUZOUBAA, N.; LACHEMI, M. Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash. **Preliminary results. Cement and concrete research**, v. 31, n. 3, p. 413-420, 2001.

CALLISTER, Jr. W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. Grupo Gen-LTC, 2016.

CAO, X. et al. A comparative study of environmental performance between prefabricated and traditional residential buildings in China. **Journal of cleaner production**, v. 109, p. 131-143, 2015.

CHEN, C. H. et al. Waste E-glass particles used in cementitious mixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 3, p. 449-456, 2006.

CHOUSIDIS, N. et al. Efeito da composição química das cinzas volantes sobre a corrosão de armaduras, difusão térmica e resistência de concretos de cimento misturado. **Construção e Materiais de Construção**, v. 126, p. 86-97, 2016.

DASH, M. K.; PATRO, S. K.; RATH, A. K. Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete—A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 2, p. 484-516, 2016.

DU, H.; TAN, K. H. Waste glass powder as cement replacement in concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 12, n. 11, p. 468-477, 2014.

DYER, T. D.; DHIR, R. K. Chemical reactions of glass cullet used as cement component. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 13, n. 6, p. 412-417, 2001.

FERREIRA, A. P. **Estudo experimental da resistência de blocos de concreto com vidro como agregado miúdo**. 2015.155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.

FANTILLI, A. P.; CAVALLO, A. D.; PISTONE, G. Fiber-reinforced lightweight concrete slabs for the maintenance of the Soleri Viaduct. **Engineering Structures**, v. 99, p. 184-191, 2015.

FERRARI, M. V. D. et al. O potencial da cadeia de resíduos de vidro de embalagem no Distrito Federal. In: **Fórum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais**. 2018.

FUSCO, P. B. **Tecnologia do concreto estrutural**. 2. Ed. São Paulo: PINI, 2008.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and building materials**, v. 22, n. 8, p. 1675-1683, 2008.

GASTALDINI, A. L. G. et al. Total shrinkage, chloride penetration, and compressive strength of concretes that contain clear-colored rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 369-377, 2014.

GONÇALVES, J. P.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R. Estudo da hidratação de pastas de cimento Portland contendo resíduo cerâmico por meio de análise térmica. **Ambiente Construído**, v. 6, n. 4, p. 83-94, 2006.

GUIGNONE, G. C. **Desempenho de concretos com a utilização de resíduos da lapidação do vidro como substitutos parciais ao cimento**. 286f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Pini; Brasília, DF.SENAI, 1992.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 1, p. 19-29, 2011.

IKPONG, A. A.; OKPALA, D. C. Strength characteristics of medium workability ordinary Portland cement-rice husk ash concrete. **Building and Environment**, v. 27, n. 1, p. 105-111, 1992.

IMBABI, M. S.; CARRIGAN, C.; MCKENNA, S. Trends and developments in green cement and concrete technology. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 1, n. 2, p. 194-216, 2012.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, 2ª Edição, São Paulo, 2018.

ISLAM, G. M. S.; RAHMAN, M. H.; KAZI, N. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 1, p. 37-44, 2017.

JAMIL, M. et al. Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 588-593, 2013.

JIN, R; CHEN, Q. An investigation of current status of “green” concrete in the construction industry. In: **49th ASC Annual International Conference Proceedings**. California: USA. 2013.

JIN, W.; MEYER, C.; BAXTER, S. " Glascrete"- Concrete with Glass Aggregate. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 208-213, 2000.

JOHN, V. M. Materiais de Construção e o Meio Ambiente. In: ISAIAS, G. C. (Org). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 3ª. ed São Paulo. IBRACON. ISBN.:978-85-98576-27-5, 2017.

KABIR, Shahid; AL-SHAYEB, Ammar; KHAN, Imran M. Recycled construction debris as concrete aggregate for sustainable construction materials. **Procedia Engineering**, v. 145, p. 1518-1525, 2016.

KAMALI, M.; GHahremaninezhad, A. An investigation into the hydration and microstructure of cement pastes modified with glass powders. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 915-924, 2016.

KARADELIS, J. N.; LIN, Y. Flexural strengths and fibre efficiency of steel-fibre-reinforced, roller-compacted, polymer modified concrete. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 498-505, 2015.

KAREIN, S. M. M. et al. A new approach for application of silica fume in concrete:

Wet granulation. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 573-581, 2017.

KEERTANA, B.; GOBHIGA, S. Experimental study of concrete with partial replacement of cement with rice husk ash and fine aggregate with granite dust. **IRACST-Eng. Sci. Technol.:** Int. J., v. 6, n. 1, p. 36-41, 2016.

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**, v. 28, n. 1, p. 680-686, 2012.

KOU, S. C.; POON, C. S. Properties of self-compacting concrete prepared with recycled glass aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 2, p. 107-113, 2009.

KOUSHKBAGHI, M. et al. Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 266-275, 2019.

KUMAR, A; GUPTA, D. Behavior of cement-stabilized fiber-reinforced pond ash, rice husk ash–soil mixtures. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 44, n. 3, p. 466-474, 2016.

LIANG, H.; ZHU, H.; BYARS, E. A. Use of waste glass as aggregate in concrete. In: **7th UK CARE Annual General Meeting**. UK Chinese Association of Resources and Environment, Greenwich. 2007.

LIEW, K. M.; SOJOBI, A. O.; ZHANG, L. W. Green concrete: Prospects and challenges. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 1063-1095, 2017.

LIEW, Y. M.; HEAH C. Y.; MUSTAFA, A. B. M.; KAMARUDIN, H. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. **Progress in Materials Science**, v. 83, p. 595-629, 2016.

LIMBACHIYA, M. C. Bulk engineering and durability properties of washed glass sand concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1078-1083, 2009.

LIN, K. L. et al. Effect of composition on characteristics of thin film transistor liquid crystal display (TFT-LCD) waste glass-metakaolin-based geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 501-507, 2012.

LING, Tung-Chai; POON, Chi-Sun. Properties of architectural mortar prepared with recycled glass with different particle sizes. **Materials & Design**, v. 32, n. 5, p. 2675-2684, 2011.

LOPEZ, D. A. R; AZEVEDO, C. A. P. de; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica** [online]. 2005, vol.51, n.320, pp.318-324. ISSN 0366-6913.

MADHAVI, T. C.; RAJU, L. S.; MATHUR, D. Durability and strength properties of high volume fly ash concrete. **Journal of Civil Engineering Research**, v. 4, n. 2A, p. 7-11, 2014.

MALIK, M. I. et al. Study of concrete involving use of waste glass as partial replacement of fine aggregates. **IOSR Journal of Engineering**, v. 3, n. 7, p. 8-13, 2013.

MARAGHECHI, H. et al. The role of residual cracks on alkali silica reactivity of recycled glass aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 41-47, 2012.

MASTALI, M.; DALVAND, A. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 196-209, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRANDA JÚNIOR, E. J. P. **Propriedades físico-mecânicas do concreto de cimento Portland contendo resíduo vítreo como agregado miúdo**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, São Luis, 2012.

MUKHERJEE, S.; MANDAL, S.; ADHIKARI, U. **Comparative study on physical and mechanical properties of high Slump and zero slump high volume fly ash concrete**. HVFAC, Global NEST J., 2013.

MÜLLER, H. S. et al. Design and properties of sustainable concrete. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 290-304, 2014.

MUNHOZ, F. A. da Cunha. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo -USP, 2007.

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

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Propriedades do concreto**. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

ÖZBAY, E.; ERDEMİR, M.; DURMUŞ, H. İ. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties—A review. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 423-434, 2016.

OZORIO, B. P. M. **Concreto leve com pérolas de EPS**: estudo de dosagens e de características mecânicas. 2016. 154 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil - Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

PAIVA, O. A. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. 2009. 208f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PARK, S. B.; LEE, B. C.; KIM, J. H. Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate. **Cement and concrete research**, v. 34, n. 12, p. 2181-2189, 2004.

PARK, Y. et al. Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with crumb rubber partially replacing sand. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 43-51, 2016.

PAUL, S. C.; ŠAVIJA, B.; BABAFEMI, A. J. A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass. **Journal of Cleaner Production**, 2018.

ROY, D. M. Alkali-activated cements opportunities and challenges. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 2, p. 249-254, 1999.

SANDHU, R. K.; SIDDIQUE, R. Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 751-764, 2017.

SCHWARZ, N.; CAM, H.; NEITHALATH, N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 6, p. 486-496, 2008.

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

SILVA, J. G. S. **Produção de concreto cimentício com agregado de resíduos de vidro plano temperado**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande, 2015.

SIMÕES, L. J. **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. 142f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. AMGH Editora, 2013.

SOUSA NETO, L. M. **Utilização de resíduo de vidro moído como adição mineral para a produção de concreto autoadensável e de alto desempenho**. 2014.150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

SURESH, D.; NAGARAJU, K. Ground granulated blast slag (GGBS) in concrete –a review. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 12, n. 4, p. 76-82, 2015.

SURESH, G. V.; KARTHIKEYAN, J. Performance enhancement of green concrete. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability**. Thomas Telford Ltd, 2016. p. 191-203.

TAHA, B.; NOUNU, G. Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p. 713-720, 2008.

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

THOMAS, M. D. A. **Optimizing the use of fly ash in concrete**. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2007.

TIWARI, A.; SINGH, S.; NAGAR, R. Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 490-507, 2016.

TOPCU, I. B. High-volume ground granulated blast furnace slag (GGBFS) concrete. In: **Eco-Efficient Concrete**. Woodhead Publishing, 2013. p. 218-240.

TOŠIĆ, N. MARINKOVIĆ, S. DAŠIĆ, T. STANIĆ, M. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. **Journal of Cleaner Production**. 87 (2015) 766–776.

YIJIN, L.; SHIQIONG, Z.; JIAN, Y.; YINGLI, G. The effect of fly ash on the fluidity of cement paste, mortar, and concrete. In: **International workshop on Sustainable Development and Concrete Technology**, Beijing, China, 2014.

YUN-MING, L.; CHENG-YONG, H.; BAKRI, M.M. AL.; HUSSIN, K. **Structure and properties of clay-based geopolymers cements**: A, Prog. Mater Sci. 83, 2016.

ZACHARIASEN, W. H. O arranjo atômico em vidro. **Jornal da American Chemical Society**, v. 54, n. 10, p. 3841-3851, 1932.

ZARZYCKI, J. **Óculos e o estado vítreo**. Cambridge University Press, 1991.

ZHANG, Z.; ZHANG, B.; YAN, P. Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 82-93, 2016.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. A methodology for assessing the chemical and physical potential of industrially sourced rice husk ash on strength development and early-age hydration of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 869-881, 2017.

ZUNINO, F.; LOPEZ, M. Decoupling the physical and chemical effects of supplementary cementitious materials on strength and permeability: A multi-level approach. **Cement and concrete composites**, v. 65, p. 19-28, 2016.