

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EDUARDA CORRÊA PEREIRA

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS MICROFISSURADOS:
INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE VIDRO COMINÚIDO E DO TIPO DE
CURA**

Alegrete

2022

EDUARDA CORRÊA PEREIRA

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DE CONCRETOS MICROFISSURADOS:
INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE VIDRO COMINUÍDO E DO TIPO DE
CURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Dra. Simone D. Venquiaruto

Co-orientador: Me. Aldo Leonel Temp

Alegrete

2022

EDUARDA CORREA PEREIRA

**RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E AUTOCICATRIZAÇÃO DE CONCRETOS MICROFISSURADOS:
INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE VIDRO COMINUÍDO E DO TIPO DE CURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 22 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

PROFA. DRA. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA
ORIENTADORA

PROF. DR. ALDO LEONEL TEMP - UNIPAMPA

PROFA. DRA. FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALDO LEONEL TEMP, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 00:29, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 09:13, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/03/2022, às 09:15, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 0765011 e o código CRC 52CA557A.

Dedico este trabalho aos meus pais
Enio e Magda, ao meu irmão
Matheus e meus avós, Sinamei e
Marilda.

AGRADECIMENTO

Agradeço, primeiramente, à Deus por estar ao meu lado sempre, me iluminando a cada passo e me proporcionando saúde e força para superar todos os obstáculos.

Aos meus pais, Enio e Magda, e meu irmão, Matheus, por sempre me apoiar nas minhas decisões e por todo apoio e incentivo pelos estudos. Aos meus Avós, Sinamei e Marilda, e ao restante da minha família, pela ajuda, pelo carinho e por estar sempre presente durante esses anos.

Agradeço aos meus orientadores, Simone Venquiaruto e Aldo Leonel Temp, por todo ensinamento, pela orientação e pelas correções feitas.

Agradeço ao meu namorado, amigo e parceiro de estudo, Matheus Giuliani, pelo auxílio e pelo impulso todos os dias para o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço aos laboratoristas, Raquel dos Santos Machado e Marcelo de Jesus Dias de Oliveira, por toda ajuda no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil, na Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Alegrete/RS, para a realização desta pesquisa.

Agradeço à minha colega e amiga, Raquel Castro, que me auxiliou em alguns ensaios de laboratório.

RESUMO

A utilização do vidro na formação de materiais com base cimentícia pode ser vantajoso, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, pois reduz o uso de materiais naturais e também diminui o impacto ambiental. Este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento mecânico e o fenômeno da autocicatrização de concretos estruturais produzidos com vidro cominuído como agregado miúdo, submetidos a carregamentos precoces nas primeiras idades e curados em distintos processos de cura. Para a produção dos concretos foi utilizado cimento CP V ARI e um traço para garantir a característica de concreto estrutural. O vidro foi utilizado em substituição em massa de 20% em relação ao agregado miúdo. Após a moldagem, os concretos receberam cura submersa inicial até a idade de sete dias, quando foram retirados da cura. Na sequência parte das amostras foi submetida a um carregamento de compressão de 75% da sua capacidade resistente e parte das amostras permaneceram íntegras. Este processo objetivou promover um dano interno importante nas matrizes cimentícias para posterior avaliação da autocicatrização dos concretos. Após esta etapa, os concretos foram divididos em dois grupos e redirecionados para a continuidade da cura em processos distintos (cura seca em ambiente de laboratório e cura submersa). Aos 28 dias, a propriedade mecânica de resistência à compressão axial foi avaliada. Os resultados obtidos mostraram que para todas as resistências os valores ficaram acima de 39 MPa, indicando que o pré-carregamento aplicado em parte dos concretos nas primeiras idades não prejudicou o seu desempenho mecânico. Os resultados também mostraram que a resistência à compressão dos corpos de prova em cura seca foi mais elevada. A incorporação do vidro no teor de 20% promoveu uma redução da resistência à compressão axial, e a pozolanidade do vidro não foi observada.

Palavras-Chave: Areia de vidro. Autocicatrização. Cura. Resistência à compressão.

ABSTRACT

The use of glass in the formation of cement-based materials can be not only economic advantageous, but also environmentally friendly, as it reduces the use of new natural materials. This paper aims to evaluate the mechanical behavior and the phenomenon of self-healing of structural concretes produced with crushed glass as a fine aggregate, subjected to early loading at early ages and cured in different curing processes. For the production of concrete, CP V ARI cement and a trace were used to guarantee the characteristic of structural concrete. Glass was used in substitution by mass of 20% in relation to the fine aggregate. After casting, the concretes received initial submerged curing until the age of seven days, when they were removed from curing. Subsequently, a portion of the samples were subjected to a compression load of 75% of its resistant capacity, whereas the other samples remained intact. This methodology intended to create a significant internal damage in the cement matrix for later evaluation of the self-healing of the concrete. Afterwards, the specimens were divided into two groups and redirected to continue curing in different processes (dry curing in a controlled environment and submerged curing). The mechanical property of axial compressive strength was evaluated at day 28, resulting in all the specimens' strengths above 39 MPa, which indicates that the preloading applied in part of the concretes in the early ages did not impair their final mechanical performance. The results also showed that the compressive strength of the specimens in dry cure was higher. In conclusion, the incorporation of glass in the 20% content promoted a reduction in the axial compressive strength, although the pozzolanicity of the glass was not observed in this analysis.

Keywords: Glass sand. Self-healing. Cure. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção anual de tipos de vidros no Brasil.....	17
Figura 2 - Reciclagem do vidro.....	18
Figura 3 - Principais causas da cicatrização autógena	30
Figura 4 - Programa experimental.....	33
Figura 5 - Curva de distribuição da granulometria da areia.....	36
Figura 6 - Moinho de bolas (a) e Vidro parcialmente moído (b)	37
Figura 7 - Curva de distribuição da granulometria da areia de vidro.	38
Figura 8 - Curva de distribuição da granulometria da mistura (areia natural com substituição de 20% por areia de vidro)	39
Figura 9 - Curva de distribuição da granulometria da brita.....	40
Figura 10 - Ensaio de abatimento do traço de referência.....	41
Figura 11 - Detalhamento da Etapa 2 do Programa Experimental por traço....	42
Figura 12 – Corpos de prova, aos 28 dias, prontos para serem rompidos.	43
Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão em 100% do carregamento do traço com vidro.....	45
Figura 14 - Média das resistências aos 28 dias (MPa).....	47
Figura 15 – Variação de resistência dos concretos com a idade (7 dias →28 dias)	49
Figura 16 - Efeito isolado do percentual de substituição do vidro na resistência à compressão axial.	51
Figura 17 - Efeito isolado do tipo de cura na resistência à compressão axial.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química do aglomerante	35
Tabela 2 – Ensaio de granulometria da areia de vidro	37
Tabela 3 – Ensaio de granulometria da composição areia natural e areia de vidro	39
Tabela 4- Caracterização da brita.	40
Tabela 5 – Traço unitário em massa Traço 01 e Traço 02.....	41
Tabela 6 – Densidade média no estado fresco e no estado endurecido.....	42
Tabela 7 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 7 dias	46
Tabela 8 - Avaliação estatística dos dados (ANOVA) para as misturas com cimento CPV RS.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Revisão de Trabalhos científicos com vidro cominuído em matrizes cimentícias.	26
Quadro 2 - Diretrizes de norma para controle de fissuração visando a durabilidade das estruturas de concreto	28
Quadro 3 – Fatores que influenciam a autocicatrização	31
Quadro 4 - Ensaio de caracterização dos materiais	34
Quadro 5 - Caracterização da areia natural.	36
Quadro 6 - Caracterização do vidro cominuído.	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Objetivos Específicos	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	Agregados convencionais e alternativos para uso em matrizes cimentícias.....	15
2.2	Vidro como material alternativo para uso em concreto	16
2.3	Concretos com vidro cominuído	19
2.4	Fissuração no concreto	27
2.5	Autocicatrização do concreto	28
2.6	Fatores que influenciam a autocicatrização do concreto	31
3	METODOLOGIA	33
3.1	Programa Experimental.....	33
3.2	Etapa – 1: Caracterização dos Materiais.....	34
3.2.1	Caracterização do Material Aglomerante	35
3.2.2	Caracterização dos Agregados Miúdos.....	35
3.2.3	Caracterização dos Agregados Graúdos.....	40
3.3	Etapa – 2: Produção, Pré-carregamento e Cura dos Concretos	41
3.4	Etapa – 3: Ensaios de Controle – resistência à compressão axial.....	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Pré-carregamento dos Concretos	46
4.2	Resistência à compressão axial	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
6	SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICE A – Planilha de ensaio de granulometria da areia natural.....	68
	APÊNDICE B – Planilha de ensaio de granulometria da brita.....	68
	ANEXO A – Temperatura e umidade relativa do ar em Alegrete no período do ensaio.....	69

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, o mundo vem se preocupando cada vez mais com o meio ambiente e com a vida da população em geral pois a degradação ambiental, por causa de resíduos descartados de forma inadequada, vem crescendo e danificando o solo, ar e água do nosso planeta. Assim, com o intuito de melhorar o desenvolvimento sustentável da Terra, a indústria da construção civil há alguns anos vem tentando introduzir algumas alternativas para minimizar o impacto ambiental, de forma a reduzir os materiais rejeitados irregularmente, transformando-os em elementos que sejam úteis para a sociedade (OLIVEIRA, 2019).

A produção de resíduo de vidro no Brasil é um dos problemas que afetam o meio ambiente, na qual tem contribuição para a poluição em aterros sanitários (PEREIRA, 2016; MARTINS, 2020). Diante disso, para reduzir esses números e contornar o impacto ambiental, uma das soluções seria a sua reciclagem e utilização na construção civil, incorporando o vidro como agregado ou material cimentício suplementar em matrizes a base de cimento Portland. Além de melhorar o planeta ao reaproveitar o material, o vidro apresenta em torno de 70% de sílica (Bauer, 2015), com isso, quando colocado nos concretos ou nas argamassas, essa substância pode melhorar o desempenho dessa matriz. O vidro é um material com características de pozolanas, quando moído em uma granulometria fina e quando entra em contato com a água em um compósito cimentício pode acarretar em propriedades semelhantes ao do cimento. No concreto, o vidro moído pode ser substituído parcialmente pelo cimento, pelo agregado miúdo ou pelo agregado graúdo, de acordo com as funções desejadas a esse material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O concreto é o principal material e o mais utilizado na construção civil e, devido a sua grande importância em sua função estrutural ou não estrutural, ele é muito estudado no meio científico na busca de novas composições, a fim de melhorar suas propriedades mecânicas e minimizar o impacto ambiental que a sua produção e consumo gera para o meio ambiente. Além disso, a indústria da construção civil produz diversos resíduos e utiliza muitos recursos naturais finitos na qual impacta o meio ambiente. Com isso, também cabe a

esta indústria a responsabilidade de minimizar os danos ambientais, por meio da busca de materiais alternativos para incorporação em matrizes cimentícias (BRASILEIRO, 2015).

A produção de concreto com o uso de vidro é uma alternativa para a redução de resíduos de vidro e também no futuro, essa possibilidade pode ser a solução para a escassez de produtos que agora ainda estão disponíveis no planeta. Como todo o material natural, algum dia a quantidade de areia natural e de brita pode ser insuficiente para sustentar o crescimento da indústria da construção civil. Com isso, deve haver uma busca de novos materiais e novas soluções para o futuro problema de ausência de matéria prima.

Durante a sua vida útil, o concreto pode sofrer carregamentos que podem causar fissuras na sua estrutura, podendo reduzir a sua durabilidade. Uma solução para o fechamento dessas fissuras é a ocorrência da autocicatrização, na qual é uma particularidade do concreto em poder se restaurar. Van Tittelboom e De Belie (2013) explicam que esse processo ocorre quando a água entra em contato com os grãos anidros e se reidrata, aumentando seu volume e ocupando o espaço da fissura.

Diante do exposto, este trabalho pretende explorar o comportamento mecânico de concretos microfissurados nas primeiras idades, produzidos com agregados alternativos (vidro cominuído) frente ao fenômeno da autocicatrização.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar o processo de autocicatrização de concretos convencionais e de concretos com substituição parcial do agregado miúdo por agregado de vidro cominuído, submetidos a carregamentos precoces nas primeiras idades.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos que nortearão esse trabalho são apresentados na sequência.

- Avaliar a influência de distintos processos de cura (em ambiente de laboratório e submersa) no processo de autocicatrização dos concretos estudados;
- Avaliar a capacidade de recuperação de propriedades mecânicas (resistência à compressão axial) de concretos convencionais e de concretos com agregado alternativo submetidos a carregamentos precoces nas primeiras idades;
- Avaliar a contribuição pozolânica do vidro cominuído no processo de recuperação das microfissuras dos concretos, através da manutenção de suas propriedades mecânicas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo (tópicos 2.1 a 2.6) será dissertado sobre os principais temas que darão embasamento teórico para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 Agregados convencionais e alternativos para uso em matrizes cimentícias

Kaefer (1998) determina o concreto como um elemento plástico na qual obtém uma aparência quando for moldado no estado fresco e, ao entrar no estado endurecido, ganha resistência considerável para que possa suportar as forças solicitantes. Entretanto, uma das grandes desvantagens do concreto simples é que ele não tem uma boa resistência à tração, com isso, é muito utilizado o aço em conjunto nas obras.

Para que o concreto tenha uma boa resistência, é preciso observar dois fatores durante a sua formação, que são a relação água/cimento e o grau de adensamento (NEVILLE, 2016). Além disso, outro fator que influencia nas propriedades do concreto é o tipo de materiais utilizados para sua formação. Os agregados têm grande atuação no concreto, pois estes podem ajudar na resistência dependendo do seu formato, composição mineralógica, e também distribuição granulométrica (PAZ, 1998).

Segundo Neville (2016), o tipo de agregado intervém no resultado do concreto, sendo como propriedades importantes no seu comportamento a condutividade, o calor específico e o coeficiente de dilatação. Neste último, quanto maior o coeficiente do agregado, maior será o coeficiente do concreto.

Os agregados naturais apresentam propriedades distintas dos agregados reciclados, interferindo rigorosamente no comportamento do concreto. Segundo Reis, Leite e Lima (2009), a desigualdade entre as propriedades do concreto natural e do renovado dependem de fatores como o teor de agregado natural substituído, da quantidade de contaminantes e finos presentes em sua composição e das características do agregado reciclado usado.

Com o passar dos anos e com a eminência de escassez de recursos naturais a médio e longo prazo, cresceu uma preocupação mundial com a questão da sustentabilidade, e na área de construção civil, não seria diferente. A procura por materiais que sejam mais baratos e que tragam uma melhor alternativa para o aproveitamento de resíduos vem aumentando significativamente nas últimas décadas. Projetos com diferentes tipos de agregados alternativos estão sendo realizados, visando a reutilização desses materiais e auxiliando o meio ambiente, através da redução do descarte de resíduos. Entre os inúmeros produtos alternativos que estão sendo estudados no meio científico para validar a sua aplicação em matrizes cimentícias está o resíduo da construção civil (RCD) (Lima, 1999; Rodrigues e Fucale, 2014; Leite, 2001), a areia de PET (Pelisser *et al.*, 2002; Carhuayano e Roberto, 2016; Meneses, 2011; Da Silva Rodrigues *et al.*, 2018) e o vidro cominuído (López, De Azevedo e Barbosa Neto, 2005; Benatti e Dos Anjos Azambuja, 2016; Nascimento *et al.*, 2014), foco desta pesquisa. Além destes produtos serem sustentáveis e terem um custo inferior, podem contribuir para melhorar algumas das propriedades do concreto, dependendo do teor em que são incorporados nas misturas.

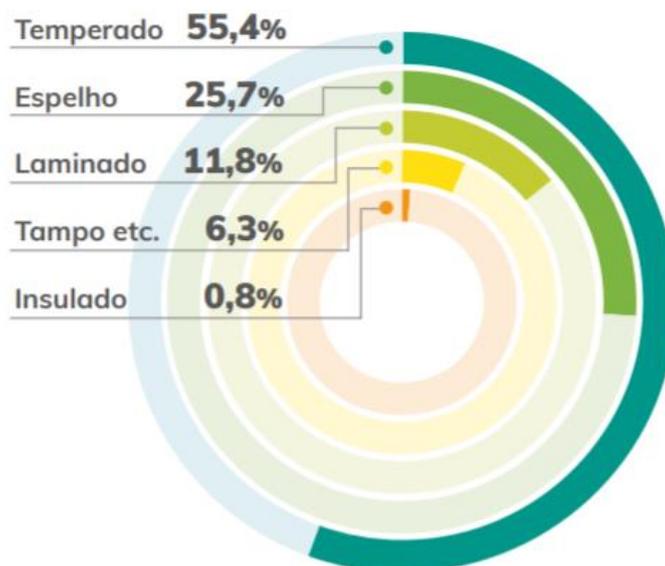
O agregado era utilizado na adição do concreto a fim de reduzir custos e ganhar volume (CANEDO, BRANDÃO e PEIXOTO FILHO, 2011). Contudo, vem sendo estudado outras vantagens que esses materiais podem apresentar, incluindo o custo-benefício, levando em conta que os agregados têm um valor comercial mais baixo que o do cimento (TINOCO *et al.*, 2018). Além disso, alguns autores como Higuchi *et al.* (2018), Sousa Neto *et al.* (2014) e Angulo e Figueiredo (2011) afirmam que a adição de determinados agregados alternativos em matrizes cimentícias, como o resíduo de vidro e o resíduo de construção, podem promover um aumento na resistência à compressão axial e na durabilidade, dependendo dos tamanhos das partículas e da porcentagem de substituição nas misturas.

2.2 Vidro como material alternativo para uso em concreto

No Brasil, a produção de vidro chega, em média, a 8,6 bilhões de unidades por ano, sendo que, dessa totalidade, são recicladas apenas 47%

(ABIVIDRO, 2019). No ano de 2018, o tipo de vidro que mais se produziu no Brasil foi o temperado, com um percentual de 55,4% da produção, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Produção anual de tipos de vidros no Brasil.



Fonte: Abravidro, 2020.

Segundo Ferrari e Jorge (s.d.), o vidro é um óxido metálico em sua forma natural, de dureza alta, inerte e biologicamente inativo. Este material pode ser transformado em diversas formas, com características lisa e impermeável. Além disso, segundo os autores, o vidro se difere dos outros materiais em muitas características, como por exemplo pela baixa porosidade, absorvidade, dilatação e condutividade térmica.

O vidro é composto por areia, barrilha, calcário, alumina e aditivos e são constituídos principalmente de dióxido de silício (SiO_2). As diferentes composições químicas do vidro o transformam em diversos produtos, com características específicas. As suas várias constituições permitem que o vidro tenha propriedades desiguais, facilitando atender a cada aplicação específica.

Segundo Souza (s.d.), a classificação do vidro quanto a composição pode ser feita de três tipos:

- **Vidro boro-silicato:** utilizado em acessórios domésticos resistentes à choques térmicos;

- **Vidro sodo-cálcico:** utilizado em embalagens de forma geral, como por exemplo o chamado vidro plano, aplicado na construção civil;
- **Vidro ao chumbo:** utilizado em peças que requerem mais brilho, como copos e taças.

De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Vidro - Abividro (s.d.), o vidro é 100% reaproveitado e reciclado, se transformando em um novo material com as mesmas características e propriedades que um vidro na qual ainda não foi reciclado. No entanto, antes do processo de reciclagem, o vidro precisa passar por um processo de lavagem para a eliminação da sujeira. Após o processo de limpeza, é levado para a trituração (Figura 2), e na sequência, o material é aquecido em um forno com temperaturas de até 1500°C. Nesta etapa ocorre o processo de derretimento, transformando o material em um líquido incandescente e pastoso. Após esse processo, o vidro adquire novas formas e funções (ANAVIDRO, 2013).

Figura 2 - Reciclagem do vidro.



Fonte: Anavidro, 2013.

De acordo com a Abividro (2019), a reciclagem do vidro no Brasil gira em torno de 120 milhões de reais em um ano. Esse número é gerado através das 8,6 milhões de embalagens que são produzidas, totalizando em 1,3

milhões de toneladas de vidro. Entretanto, não são todos os vidros que podem ser reciclados em função da sua composição ou da separação inadequada.

Para Fragmaq (2016), temos cinco classes de vidros, quanto a tipologia, que são mais utilizados para a fabricação de outros vidros, que são: vidro comum (categoria que se encontram os potes, garrafas, copos, dentre outros); o vidro temperado (que é um pouco mais resistente e precisa de um tratamento diferenciado); o vidro reflexivo; o vidro laminado; e o vidro cristal.

O vidro reciclado, além de produzir novas embalagens, também tem outras aplicações consolidadas, podendo ser utilizado na mistura asfáltica, no sistema de drenagem, em bijuterias e em tintas reflexivas. Com a reciclagem do vidro, é evitado de que esse material fique poluindo o meio ambiente por diversos anos e colaborando para a economia de novos materiais (ENBRI, 1994).

2.3 Concretos com vidro cominuído

Atualmente, o vidro é um dos materiais que está sendo mais pesquisado e utilizado, principalmente como agregado fino para a produção de concreto. Um exemplo de país que utiliza esse elemento é a Austrália, na qual reutiliza o vidro para colocá-lo na construção civil (SAGOE, BROWN e TAYLOR, 2001). Segundo Lima (2015), a Austrália utiliza a substituição da areia por vidro reciclado em porcentagens de 10% a 20% para concreto com funções estruturais (viga, laje e pilar) e de 50% para concretos não estruturais. No Brasil, essa prática não é tão comum, em função da disponibilidade de materiais de construção.

Além de conceder um destino adequado para o vidro, no ponto de vista ambiental, seu resíduo atua melhorando as propriedades do concreto podendo ser considerado uma adição ou uma substituição do cimento, do agregado graúdo ou do agregado miúdo, tornando o tamanho das partículas um fator de grande influência nas características finais do concreto (HIGUCHI *et al.*, 2018).

Armellini e Fernandes (2004) afirmam que o uso do vidro já está sendo empregado em setores como na construção de estradas, como agregados de concreto, fibra de vidro para isolamento térmico, pavimentação asfálticas, dentre outros.

Na construção civil, o vidro mais utilizado é o sodo-cálcico (DOS SANTOS, 2016). Além disso, segundo Mehta e Monteiro (2008), esse tipo de vidro possui características semelhantes à de um material cimentício pozolânico. Quando moído finamente e colocado em contato com a água, ele se soma com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente e formam substâncias com propriedades cimentantes.

Polley *et al.* (1998) analisaram o vidro como um material que poderia substituir a areia no concreto. Eles concluíram que essa troca é aceitável até 20% de agregados naturais finos e alterando entre 0,075 e 1,5 mm a sua granulometria. Além disso, a resistência à compressão é semelhante a concretos de mesmo traço utilizando areia como agregado fino. Esses autores também concluíram que o vidro pode ser considerado um material pozolânico, quando substituir a areia.

As pozolanas são materiais naturais que vem de rochas magnéticas ou sedimentares e são ricas em sílica (OLIVEIRA, 2010). Bauer (2015) explica que o vidro é composto 70% por sílica ou dióxido de silício (SiO_2), assim podendo ser considerado um material pozolânico. Além disso, essa substância quando adicionado ao concreto proporciona uma melhoria nas propriedades mecânicas e na sua durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008; NEVILLE, 2013).

A sílica pode ser um fator limitante para o uso de grandes porcentagens de vidro no concreto pois ela pode causar as chamadas “Reações Álcali-Silica” (RAS). Quando a sílica entra em contato com os íons de concreto, as reações se formam e causam uma expansão no concreto ocasionando fissuras e comprometendo a estrutura. Uma solução para este problema é o uso de materiais neutralizantes, como por exemplo, material pozolânico, sílica ativa, escória de alto forno contendo materiais pozolânicos, entre outros. Além disso, a escolha do cimento adequado também é uma boa alternativa para evitar as RAS, para isso os cimentos que apresentam menos chances dessa ocorrência são: CP II E, CP II Z, CP III e CP IV. (NOGUEIRA, 2010).

Outro fator que influencia nas RAS é a granulometria do vidro. O aumento do volume do concreto pode ser contido com uma granulometria mais fina, ou seja, menores que 75 μm (SHI *et al.* (2005), PAIVA *et al.* (2009), WANG (2011), KHMIRI *et al.* (2012), LING e POON (2012), MATOS e SOUZA-COUTINHO (2012) e PEREIRA-DE-OLIVEIRA *et al.* (2012)).

Polley *et al.* (1998) e Meyer e Xi (1999) afirmam que quando o vidro é utilizado com granulometrias elevada, o concreto fica com baixa resistência à compressão, pois o vidro fica com características diferentes. Segundo os autores, há alteração na forma de fratura, características superficiais pobres e alta fragilidade. Além disso, essa redução pode estar relacionada à diferença na força de ligação entre a pasta e o agregado.

Segundo Mehta e Monteiro (2014) e Carvalho (2012), a adição de vidro em concretos permitem a melhoria de propriedades mecânicas, como a resistência à compressão em idades mais avançadas, diminuição da porosidade, elevação da resistência à sulfatos e a melhora na durabilidade do composto. Além disso, Carvalho (2012) ainda afirma que as pozolanas com teores de até 50% tem melhores resultados nas adições em concretos.

Os fatores que influenciam na qualidade e resistência do concreto são: tempo de cura; tamanho das partículas; porcentagem de vidro; e composição química do vidro.

Porcentagens de vidro mais elevada que 50% no concreto acarretam em uma redução da resistência à compressão em que pode ocorrer devido às forças distintas entre a pasta e o vidro, que, ao serem comparados com um agregado natural, são mais fracas (POLLEY *et al.*, 1998). Além disso, Adaway e Wang (2015), em seus experimentos, afirmam que granulometrias maiores que 1,18 mm prejudicam o concreto e são mais propícios a ocorrer a RAS (reação álcali-sílica).

Righi *et al.* (2012) realizaram sua pesquisa substituindo a areia natural em concretos por diferentes proporções de vidro. As porcentagens de substituição foram de 0%, 5%, 10%, 15%, 20% e 100%. Foi utilizado um traço massa de 1: 1,94: 3,06 (cimento, areia e brita), uma relação água/cimento de 0,45 e cimento Portland CP IV-32. Os autores concluíram que o teor mais adequado para a substituição da areia foi o de 20%, pois foi o teor de substituição que mais se aproximou da resistência da amostra de referência. O resultado do concreto com 100% de agregado miúdo de vidro também apresentou uma resistência alta, porém não seria aconselhável o seu uso. Segundo o autor, a perda de trabalhabilidade apresentada por esta mistura, acabou dificultado o processo de moldagem das amostras.

Miranda Junior *et al.* (2012) estudaram concretos com 0%, 5%, 10% e 20% de vidro de substituição de areia, com três relações água/cimento (0,50, 0,55 e 0,58) e cimento Portland pozolânico CP IV-32. Os corpos de prova que apresentaram os melhores resultados em sete (7), quatorze (14) e vinte e oito dias (28) dias foram os traços com 5% de vidro e relação água/cimento de 0,50 ($f_c = 20,79$ MPa), 10% de vidro e relação água/cimento de 0,50 ($f_c = 22,4$ MPa) e 5% de vidro e relação água/cimento de 0,50 ($f_c = 25,83$ MPa), respectivamente. Segundo os autores, as amostras que resultaram as piores resistências em sete (7), quatorze (14) e vinte e oito (28) dias foram os traços com 0% de vidro e relação água/cimento de 0,58 ($f_c = 9,14$ MPa), 0% de vidro e relação água/cimento de 0,58 ($f_c = 12,7$ MPa) e 0% vidro e relação água/cimento de 0,58 ($f_c = 14,74$ MPa). Os autores concluíram que a quantidade de água influenciou de forma significativa na resistência mecânica dos concretos. Observou que quanto maior a variação do volume de água disponível para a hidratação do cimento, maior foi o número de poros gerados, e conseqüentemente menor foi a resistência de compressão das misturas.

López, De Azevedo, Barbosa Neto (2005) estudaram concretos produzidos com cimento CP IV-32 e com substituição parcial de areia natural por vidro cominuído em três etapas distintas. A primeira etapa foi utilizada faixas granulométricas de 0-0,15 mm; 0,15-0,30 mm e 0,30-0,60 mm com 5% de teor de substituição de areia de vidro. Os resultados mostraram que até a granulometria de 0,15-0,30 mm a tensão média de ruptura à compressão axial apresentou um aumento. Para a faixa granulométrica de 0,30-0,60 mm, o valor da resistência dos concretos diminuiu, mas se manteve mais elevado do que as do concreto de referência (sem areia de vidro). Na segunda etapa, foi analisado a influência de diferentes teores de vidro, com porcentagens de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% e com a granulometria que teve melhor resultado anteriormente (0,15-0,30 mm). Nesta etapa se destacou os concretos com 20% de substituição, apresentando um aumento de 57% na resistência à compressão axial, em relação a resistência do concreto de referência. Esse resultado é explicado, segundo os autores, pelo fato de a granulometria utilizada estar dentro da faixa ideal, contribuindo para a diminuição dos vazios. Além disso, essa quantidade elevada de finos tende a elevar a superfície específica dos sólidos para serem hidratados ocorrendo uma diminuição na relação a/c e

assim um aumento na resistência à compressão. Essa redução do fator a/c é devido a uma diminuição de índices de vazios, tornado o concreto menos poroso. E a terceira parte foi averiguado a influência do peso do vidro em relação ao da areia que foi as mesmas porcentagens que a segunda etapa. Essa última parte mostrou que o concreto com 5% de adição de vidro teve um aumento de 56,6% em relação a resistência de referência.

Cenci (2019) realizou seu estudo em *Pavers* de concreto confeccionados com cimento CP V e com incorporação de vidro em substituição a areia, nos teores de 0%, 10%, 20% e 30%. O autor concluiu que para as misturas com teor de 10% de vidro, os resultados de resistência apresentaram um aumento de 20,56 % dos 7 para os 28 dias. Para os *Pavers* com 20% de vidro, as resistências se mantiveram constantes entre 7 e 28 dias, com valores mais elevados do que a da mistura de referência. Segundo o autor, entre os traços investigados, a menor resistência mecânica foi observada para os concretos com 30% de vidro cominuído.

Fonseca, Piovesan e Lopes (2019) trabalharam com concreto com substituição parcial de vidro sobre a areia em massa, com porcentagens de 0%, 15% e 25%, com relação água/cimento de 0,45 e cimento CP IV – 32. Em seus resultados, os autores concluíram que o aumento do teor de vidro nas misturas promoveu perda da resistência mecânica dos concretos, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias.

Martins (2018) realizou seu trabalho sobre a influência da resistência à compressão axial de concreto com adição parcial de vidro na substituição de areia (teores de 0%, 5%, 10 % e 15%), com relação água/cimento de 0,50 e cimento CP II – E. A autora concluiu que os concretos que apresentaram ganhos nos valores de resistência foram os teores de substituição de: 10% em três (3) dias, 10% em sete (7) dias e 5% em vinte e oito dias (28 dias), sendo que, das combinações feitas, todos os corpos de prova que foram rompidos em 28 dias, os resultados deram menor que a referência.

Dos Santos (2016) realizou seu estudo sobre a influência na resistência à compressão axial de argamassas com dois tipos de substituição parcial, adição de vidro em relação ao cimento CP IV ARI e também em relação ao agregado miúdo, separadamente; e depois analisando essas substituições parciais em conjunto. Os teores utilizados, tanto para o cimento quanto para o

agregado, foram de 0%, 10%, 15% e 20% com a relação água/cimento variando em 0,49 e 0,70. Além disso, foram realizados três tipos de cura da argamassa (cura normal, submersa e em estufa). Em geral, os resultados das misturas com as substituições apresentaram resistências inferiores à mistura de referência. Em relação aos diferentes tipos de cura, Santos (2016) observou que os melhores resultados foram observados para as amostras curadas em estufa com uma temperatura de $70 \pm 2^\circ\text{C}$.

Simões (2013) estudou o concreto com adição de vidro na substituição parcial do cimento CP V ARI com porcentagens de 0%, 5%, 10% e 15% em massa e foi utilizado a relação água/cimento de 0,53. Os corpos de provas foram rompidos nas idades de 3, 7, 28, 91 e 270 dias. Os resultados mostraram que nas quatro primeiras datas de rompimento, as resistências ficaram abaixo da resistência da mistura de referência (sem vidro). Segundo o autor, somente na data de ruptura de 270 dias, os concretos com teor de 10 % de vidro apresentaram resistência à compressão axial igual à da mistura de referência. Nassar e Soroushian (2012) e Shayan e Xu (2006) justificam que o aumento tardio da resistência dos concretos com vidro pode ser associado comportamento pozolânico do vidro, que fornece à mistura uma elevação da resistência nas maiores idades.

Higuchi *et al.* (2018) trabalharam com substituição parcial do cimento por vidro em concretos produzidos com cimento CP-IV. As porcentagens de substituição foram de 0%, 10%, 15%, 20% e 25% em peso. Os autores observaram que a resistência à compressão axial foi maior no concreto com adição de 15% de vidro, com redução de apenas 9% da resistência do corpo de prova de referência. E a menor resistência analisada foi a mistura com substituição de 25%, com diminuição de 27% da resistência de referência.

Pereira (2016) trabalhou com substituição do agregado graúdo por vidro no concreto, com porcentagens de 0%, 5%, 10%, 20% e 100%, com relação água/cimento de 0,50 e uso do cimento CP II-F-32. Os resultados de resistência à compressão axial obtidos indicaram que a mistura com de 20% de vidro apresentou resistência mais elevada que a mistura de referência, e com menores índices de vazios. Para a propriedade de resistência à tração, os resultados mais promissores foram observados para os concretos com a adição de 5% de vidro, com 42% de ganho em relação à mistura de referência.

Oliveira (2019) estudou concretos com substituição em massa de vidro por agregado graúdo, com relação água/cimento de 0,60 e cimento CP V ARI. As porcentagens de substituição do vidro foram de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%. Os resultados obtidos mostraram que as resistências à compressão axial reduziram com o aumento do teor de vidro nos concretos. Entre as misturas investigadas, os melhores resultados foram observados as misturas com 20% e 60% de substituição aos 7 dias, com uma diminuição na resistência à compressão de 10,08% e 9,56% respectivamente, comparando com o traço de referência.

No Quadro 1 é apresentado um resumo dos trabalhos abordados neste tópico e dos resultados alcançados pelos pesquisadores.

Quadro 1- Revisão de Trabalhos científicos com vidro cominuído em matrizes cimentícias.

Autor	Matriz	% vidro utilizado	Propriedades avaliadas	Conclusões
López, Azevedo, Barbosa Neto (2005)	Concreto	5% 10% 15% 20%	Resistência à compressão axial de concretos com diferentes granulometrias e diferentes teores de vidro substituindo areia.	A granulometria de 150-300 µm foi a que apresentou os melhores resultados. O traço com teor de vidro de 20% mostrou o melhor desempenho de resistência entre os traços estudados, superando em 57% a mistura de referência. O melhor teor foi o de 5% um com um aumento de 56,6% da resistência à compressão axial em relação à mistura de referência (sem agregado de vidro).
Débora Righi <i>et al.</i> (2012)	Concreto	5% 10% 15% 20% 100%.	Resistência à compressão axial de concretos com substituição parcial do agregado miúdo por vidro cominuído e submetidos a elevada temperatura.	Em temperatura ambiente, a resistência à compressão axial foi diminuindo até o teor de 15%. O traço com 100% e substituição do agregado miúdo por de areia por vidro, apresentou a resistência foi a mais elevada. O aumento no tempo de exposição dos concretos a uma temperatura de 600°C promoveu perdas nas propriedades mecânicas avaliadas.
Lorena Jordoni Simões (2013)	Concreto	5% 10% 15%	Propriedades mecânicas dos concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição de cimento em massa por vidro cominuído.	Redução da resistência à compressão axial com a variação da quantidade de cimento; O melhor resultado foi observado para o traço com a substituição-de 10%, aos 270 dias.
Artur Henrique Pereira (2016)	Concreto	5% 10% 20% 100%	Resistência à compressão axial e tração por compressão diametral.	O concreto com porcentagens de 20% de vidro cominuído substituindo o agregado graúdo foi o que apresentou melhor resultado de resistência à compressão. Para a propriedade de resistência à tração, os melhores resultados foram observados para os traços com teores de substituição de 5% e 10%.
Diogo Pereira Dos Santos (2016)	Argamassa	15% 20%	Resistência à compressão axial de argamassas com porcentagens de vidro cominuído substituindo o cimento e o agregado miúdo.	Quanto às propriedades mecânicas, o melhor resultado foi com a argamassa com 10% de vidro em substituição ao cimento. Com o aumento da porcentagem, foi observado elevação no o teor de ar incorporado, tanto nas substituições de cimento quanto nas de agregado miúdo.
Adma Magni Darwich Higuchi <i>et al.</i> (2018)	Concreto	5%, 10%, 15%, 20%	Efeito de diferentes teores de resíduo de vidro moído em substituição ao cimento para a produção de concreto autoadensável de Alto Desempenho.	No estado endurecido, o concreto com 15% de vidro foi o que apresentou o melhor resultado.
Ianne Sousa Martins (2018)	Concreto	5% 10% 15%	Análise de resistência à compressão axial de concretos com substituição parcial do agregado miúdo por vidro reciclado.	Para as idades de controle de três (3) e sete (7) dias, a substituição de até 10% de vidro promoveu aumento da resistência à compressão axial. Para a idade de 28 dias, a resistência diminuiu com a elevação dos teores de substituição.
Jhonata Alves Fonseca, Jayne Piovesan e Raduan Krause Lopes (2019)	Concreto	15% 25%	Resistência à compressão axial.	Para as idades de sete (7) e vinte e oito dias A resistência diminuiu com o aumento da porcentagem de vidro nas misturas.
Charles Severo Cenci (2019)	Concreto	10% 20% 30%	Análise das propriedades mecânicas de <i>pavers</i>	Os <i>pavers</i> com substituição de 10% de vidro apresentaram um aumento de 20,56% na resistência à compressão entre de 7 e 28 dias
Tiago César Miranda De Oliveira (2019)	Concreto	20% 40% 60% 80% 100%	Análise do comportamento do concreto com substituição de agregado graúdo por vidro temperado.	Com o aumento da porcentagem de substituição, a resistência à compressão axial foi diminuindo.

Fonte: Própria autora

2.4 Fissuração no concreto

O concreto é um material que pode ter alguns problemas de fissuração devido à fatores físicos e químicos, diminuindo a sua durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Muitos autores afirmam que quanto maiores os perímetros de grandeza, abertura e profundidade, mais elevado será as chances de a estrutura vir a ruína (BIANCHIN, 2018).

A fissuração no concreto pode aparecer tanto nas horas iniciais quanto depois de alguns anos do concreto ter sido lançado, e a maneira em que pode ocorrer esse surgimento é por vários meios e processos (DAL MOLIN, 1988).

Bonic *et al.* (2015) afirmam que em uma edificação a variação térmica é uma das principais causas da deterioração que levam a ocorrência de fissuras. Segundo os autores, a variação térmica faz com que o agregado e a argamassa se expandam, e devido seus coeficientes de dilatação serem diferentes, ocorre a fissuração do concreto. Segundo Bianchin (2018), a manifestação da fissuração faz com que a estrutura fique exposta às intempéries, facilitando a entrada de água e agentes agressivos.

Outra explicação do acontecimento de fissuras é a aplicação de cargas, a influência do clima, a corrosão das armaduras, dentre outros (BRITZ, 2013). Além disso, as formações de fissuras podem ser decorrentes de mais de um evento ao mesmo tempo (GUPTA, DAI PANG e KUA, 2017).

Dal Molin (1988) informa que as ocorrências de fissuras no concreto podem ter origem interna, externa ou ambiental, e que as fissuras podem ser formadas fechadas ou abertas, gerando danos na estrutura.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) define um valor de Estado Limite de Abertura de Fissuras (ELS-W) para concreto simples, armado e pretendido. Os valores de limitação das fissuras são classificados através das diferentes classes de agressividade apresentados na norma. Além disso, a norma define um valor máximo de abertura de fissuras para que não ocorram danos mais severos na estrutura (Quadro 2).

Quadro 2 - Diretrizes de norma para controle de fissuração visando a durabilidade das estruturas de concreto

Tipo de concreto estrutural	Classe de agressividade ambiental (CAA)	Exigências relativas à fissuração	Combinação de ações em serviço a utilizar
Concreto Simples	CAA I a CAA V	Não há	-
Concreto armado	CAA I	$ELS-W-wk \leq 0,4$ mm	Combinação frequente
	CAA II e CAA III	$ELS-W-wk \leq 0,3$ mm	
	CAA IV	$ELS-W-wk \leq 0,2$ mm	
Concreto protendido nível 1 (protensão parcial)	Pré tração com CAA I ou pós tração com CAA I e II	$ELS-W-wk \leq 0,2$ mm	Combinação frequente
Concreto protendido nível 2 (protensão limitada)	Pré tração com CAA II ou pós tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação frequente
		ELS-D (a)	Combinação quase permanente
Concreto protendido nível 3 (protensão completa)	Pré tração com CAA III e IV	Verificar as duas condições abaixo	
		ELS-F	Combinação rara
		ELS-D (a)	Combinação frequente

a) A critério do projetista, o ELS-D pode ser substituído pelo ELS-DP com $a_p=50$ mm

Fonte: NBR 6118 (ABNT, 2014).

Helene e Da Silva Filho (2011) afirmam que, caso o limite de abertura de fissura passe do valor determinado na norma, é necessário realizar uma verificação na fissura para descobrir qual é o cobrimento efetivo da armadura.

A fissuração pode ser classificada em diversos tipos, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Com isso, no estado fresco, elas são classificadas em três pontos que podem ocorrer a abertura de fissuras, sendo eles: assentamento plástico do concreto, movimentação das formas e dessecação superficial. Por outro lado, no estado endurecido, esses pontos são diminuídos a dois, sendo eles: variação dimensional e sobrecarga (BIANCHIN, 2018).

2.5 Autocicatrização do concreto

A autocicatrização é definida como uma particularidade do concreto em restaurar ou até mesmo corrigir as falhas, propriedade que também pode ser

percebida nos seres vivos quando um tecido de pele se recupera ou quando os ossos se regeneram (ZWAAG, 2008). Também é conhecida por ser uma propriedade que melhora o desempenho do concreto quando ocorre o dano (RILEM 221 - SHC).

Para que ocorra o processo de autocicatrização é preciso de um gatilho, ou seja, ela inicia apenas com o aparecimento de alguma fissura no concreto. Diante disso, o concreto pode dar início ao seu processo de autocura. Assim, a técnica de autocicatrização por meio da hidratação dos minerais do clínquer devido a uma hidratação constante ou a carbonatação de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), entretanto o resultado da cicatrização pode depender do tamanho das fissuras e da existência de água (CAPPELLESSO, 2018).

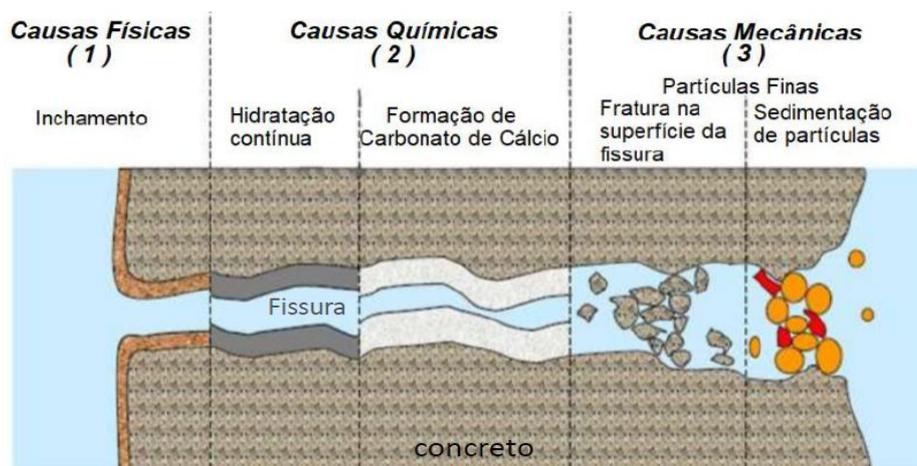
Quando o concreto é fissurado e o cimento anidro entra em contato com a água da atmosfera, começa a se reidratar, ocorrendo assim um aumento de volume na qual ocupa completa ou parcialmente os espaços das fissuras (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Segundo RILEM, a autocura do concreto pode ser classificada em autógena e autônoma. A cicatrização autógena é conhecida como um procedimento natural na qual sua autocura é devido métodos que são realizados no concreto em si (EDVARSEN, 1999; TER HEIDE, 2005). Esse fenômeno é uma explicação de porque os edifícios com mais idade sobrevivem sem muita manutenção (GHOSH, 2009). Os mecanismos autógenos são eventos que preenchem e selam as fissuras devido algumas reações químicas no próprio cimento (MOREIRA, 2016).

Contudo, a cicatrização autógena tem suas desvantagens, como por exemplo as grandes fissuras não têm tanta eficácia quanto as menores, e também, o processo de autocicatrização se inicia apenas com a presença de água, limitando os ambientes disponíveis para esse mecanismo funcionar (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Kishi (2017) relaciona a ocorrência da cicatrização autógena a três tipos distintos de causas, as causas físicas, as causas químicas e as causas mecânicas (Figura 3).

Figura 3 - Principais causas da cicatrização autógena



Fonte: EDVARSEN, 1996.

Moreira (2016) cita como causas físicas o inchamento. Nesse processo, a pasta de cimento sofre uma inchação em função da absorção da água, influenciando na redução da passagem de fluido em torno de 10%.

As causas químicas podem ser divididas em dois fundamentos: hidratação contínua ou tardia e formação de carbonato de cálcio. A primeira tem essa denominação pois as causas químicas podem acontecer em função da hidratação tardia do cimento anidro, entretanto a fissura não é completamente fechada, deixando essa com espessuras em torno de 0,1 mm. Já a segunda causa química ocorre devido a união de íons de cálcio com os íons de carbonato (CO_3^{2-}) que vem da água da fissura (DE ROOIJ *et al.*, 2013).

Nas causas mecânicas também ocorre uma divisão em duas classificações, que são elas: fratura na superfície da fissura e sedimentação de partículas. Segundo De Rooij *et al.* (2013), esse tipo de causa da cicatrização autógena tem uma pequena atuação na autocicatrização do concreto, entretanto ela pode colaborar para que ocorra esse processo.

A autocura pode ser classificada em cicatrização autônoma, em que consiste na adição de outros materiais e novos processos para auxiliar na autocicatrização do concreto (DE ROOIJ *et al.*, 2013). Os trabalhos relacionados a esse tipo de autocura são voltados a interdisciplinaridade pois podem utilizar o campo de materiais poliméricos, mecânica dos fluidos e também da biologia (BIANCHIN, 2018).

2.6 Fatores que influenciam a autocicatrização do concreto

A autocicatrização do concreto é influenciada por alguns fatores como tipo de cimento, largura da fissura e existência de água na fissura (EDVARDSEN, 1996; DE ROOIJ *et al.*, 2013). Edvardsen (1996) apresentou alguns fatores que podem causar alguma interferência na cicatrização do concreto (Quadro 3).

Quadro 3– Fatores que influenciam a autocicatrização

Concreto	Água	Fissura
Tipos de cimentos	Pressão	Largura
Tipo de adições	Gradiente de pressão	Comprimento
Tipo de agregados	Dureza	Fissura por flexão x “Fissura passantes”
Idade	pH Temperatura	Fissuras ramificadas Fissuras acumuladas

Fonte: EDVARDSEN, 1996

A largura da fissura que não exerce os valores de máximos das normas não causam problemas no concreto armado. Por outro lado, quando esse número é maior que o limite pode ocasionar uma corrosão das armaduras exposta danificando assim a durabilidade do sistema (CAPPELLESSO, 2018).

Segundo Neville (2016), para que uma fissura seja vista a olho nu ela deve ter abertura mínima em torno de 0,13 mm, e além disso elas se tornarão aparentes com o tempo e quando aparecer sujidade.

Algumas normas apresentam valores máximos de abertura de fissura. A NBR 6118 (ABNT, 2014) diz que as fissuras fora dos limites entre 0,2 e 0,4 mm tem uma grande influência na autocicatrização do concreto, apresentando risco à estrutura. Já o ACI 318 (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008) diz que as fissuras, quando estão em área internas, podem apresentar abertura até 0,4 mm, e quando nas áreas externas, podem exibir até 0,3 mm para que não ocorra nenhum dano no concreto.

Outro fator de grande influência na autocicatrização é o tipo de cimento, no qual cada um tem a sua finura já definida (GJØRV, 2015). Quando o cimento é mais fino, ele pode auxiliar para que o concreto tenha uma maior resistência de maneira mais acelerada em função de ter uma área de partículas do clínquer maior, e assim, elevando o índice de hidratação (DESHPANDE,

2007). De Rooij *et al.*, (2013) falam também que grãos mais finos tem uma menor quantidade de material anidro à disposição do processo de autocicatrização autógena, ou seja, o concreto tem maior capacidade de se autorregenerar sem que ocorra o incentivo do ambiente.

A velocidade de hidratação depende de cada tipo de cimento. O cimento CP V – ARI é um cimento considerado fino e puro e suas hidratações ocorrem nas primeiras idades, ou seja, até os 7 dias, por outro lado, no cimento CP IV, as reações de hidratação ocorrem em mais dias, ou seja, em 28 dias (DESHPANDE, 2007).

Conforme Neville (2013), a relação água/cimento é outro fato que influencia na autocura do concreto, em função de existir um valor mínimo para que ocorra a hidratação completa do cimento, que é de em torno de 0,36. Segundo o autor, quando é utilizado número menores que este, a autocicatrização não se forma integralmente devido a não ter um local considerável para a adequação dos elementos de hidratação. Neville (2013) reforça que se a estrutura de concreto não estiver em um ambiente com água externa, esse valor de água/cimento deve ser maior que 0,36, facilitando assim que ocorra uma hidratação completa. Entretanto, Jensen e Hansen (2001) discordam e apontam o valor limite de água/cimento de 0,42 para que o concreto não necessite de auxílio da água externa e tenha uma boa hidratação.

Na cicatrização autógena tem como grande influência a idade da abertura de fissura pois, nas pequenas idades, o concreto tem alta capacidade de autocura em função da parcela de cimento que não foi hidratado (YANG, YANG e LI, 2011). Por outro lado, nas maiores idades não há a mesma quantidade de material disponível para a autocicatrização, sendo assim, a capacidade de autocura diminui (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Zhong e Yao (2008) relatam que quando o concreto é fissurado nas primeiras idades, tem suas propriedades mecânicas e ultrassônicas melhor recuperadas, entretanto quando ocorre as fissuras aos 60 dias, essa regeneração é praticamente inexistente.

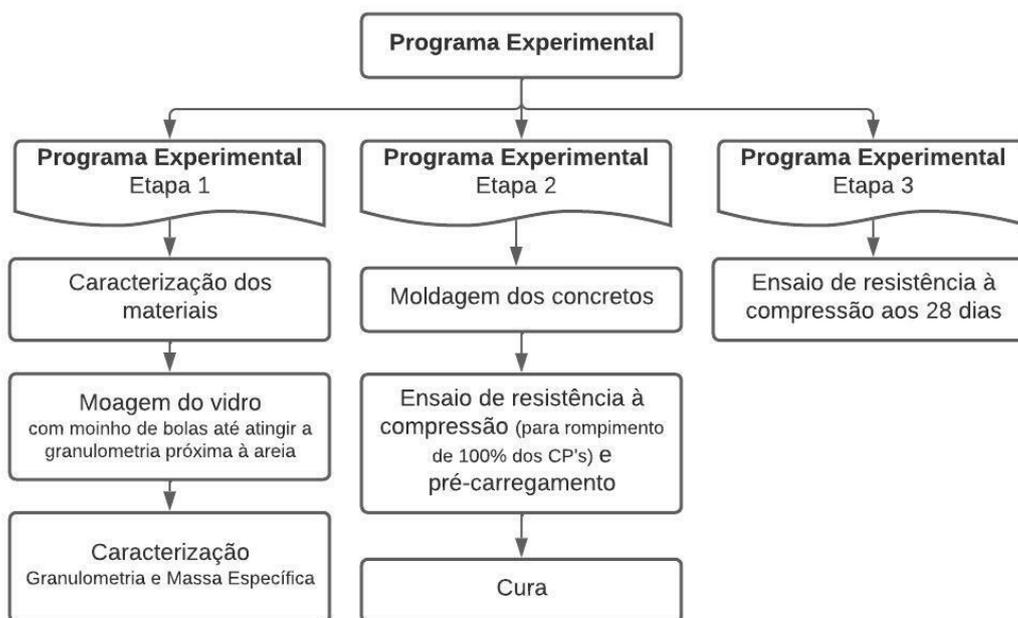
3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os métodos que foram utilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

3.1 Programa Experimental

O experimento foi executado no município de Alegrete-RS no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete/RS. O programa experimental foi organizado em três etapas distintas, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Programa experimental



Fonte: Própria autora

O programa experimental foi desenvolvido tomando como base um traço de concreto de resistência estrutural (35MPa). O traço foi previamente definido em um estudo de dosagem, preliminar ao desenvolvimento da pesquisa. Foram avaliados dois traços distintos quanto ao fenômeno da autocicatrização dos concretos. Um dos traços foi confeccionado com 100% de agregado miúdo

natural (Traço de referência) e outro traço foi produzido com substituição em massa de 20% do agregado miúdo por vidro cominuído.

3.2 Etapa – 1: Caracterização dos Materiais

A etapa de caracterização corresponde ao conjunto de ensaios que foram realizados para determinar as propriedades dos materiais selecionados para a confecção das misturas.

A caracterização do aglomerante e do aditivo superplastificante foi obtida dos respectivos fabricantes. A caracterização dos agregados (areia natural, areia de vidro e brita) foi executada no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia civil da Unipampa, campus Alegrete/RS.

O Quadro 4 apresenta a descrição dos ensaios que serão executados para a caracterização dos materiais e suas respectivas normas técnicas.

Quadro 4 - Ensaios de caracterização dos materiais

Material	Propriedades	Obtenção	Norma Regulamentadora
Aditivo Superplastificante	Químicas	Fabricante	-
Cimento Portland	Físicas, químicas e mecânicas	Fabricante	-
Agregado Miúdo	Granulometria	Ensaio Laboratoriais	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa Específica		NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Aparente		NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Unitária		NBR 16972 (ABNT, 2021)
Agregado Graúdo	Granulometria	Ensaio Laboratoriais	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Massa Específica		NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Aparente		NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Massa Específica Unitária	NBR 16972 (ABNT, 2021)	

Fonte: Própria autora.

3.2.1 Caracterização do Material Aglomerante

Como material aglomerante foi utilizado cimento Portland CPV ARI-RS. A caracterização do material foi fornecida pelo fabricante e é apresentada na Tabela 1. A escolha deste tipo de cimento também se justifica por apresentarem um baixo teor de adições minerais, o que permitirá melhor análise da ação pozolânica do vidro no processo de autocatrização dos concretos.

Tabela 1 - Caracterização química do aglomerante

Substância	Concentração (% em massa)
Silicato tricálcico	20 - 70
Silicato dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de cálcio	2 - 8
Aluminato tricálcico	1 - 15
Carbonato de cálcio	0 - 25
Óxido de magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de cálcio (livre)	0 - 2

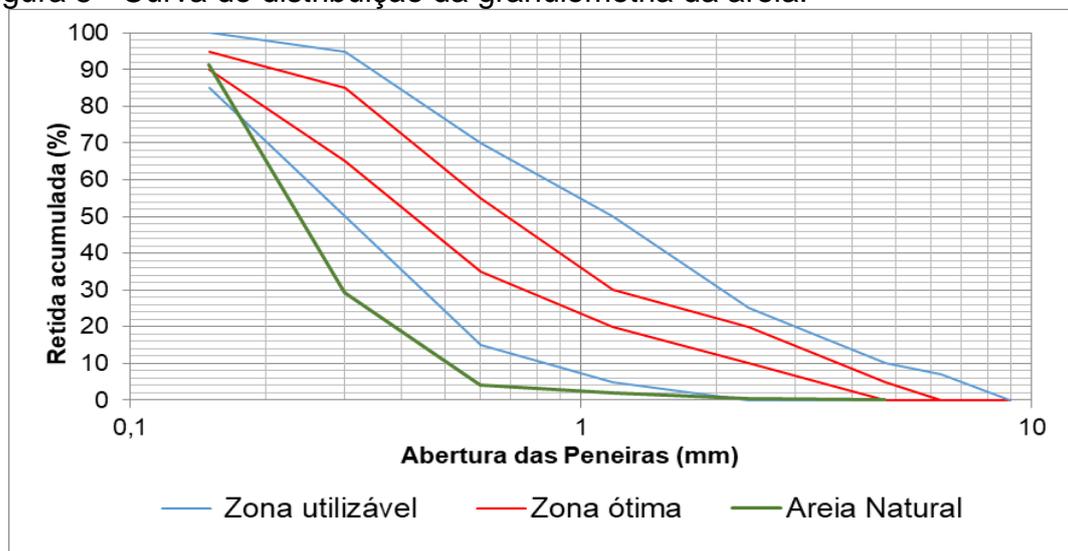
Fonte: Fabricante

3.2.2 Caracterização dos Agregados Miúdos

A Figura 5 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo utilizado para a produção dos concretos. A areia natural apresentou módulo de finura de 1,27 e diâmetro máximo de 0,60 mm. O agregado miúdo não se enquadrou dentro dos limites normativos recomendados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), porém é uma areia utilizada comercialmente na região e será empregada para a composição dos concretos. Aliado a isso, existe uma dificuldade de aquisição de agregado miúdo com maior módulo de finura na região. Os dados do ensaio de granulometria da areia natural estão dispostos no Apêndice A.

A norma da ABNT 7211:2009 também permite classificar a areia de acordo com a sua granulometria. Em função dessa classificação, pode-se dizer que a areia utilizada no projeto foi qualificada como uma areia fina.

Figura 5 - Curva de distribuição da granulometria da areia.



Fonte: Própria autora.

As propriedades de massa específica e massa unitária da areia natural também foram determinadas e estão apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Caracterização da areia natural.

Ensaio	Normativa	Resultados
Massa Específica	NBR 9776:1987	2,66 g/cm ³
Massa Unitária	NM 45:2006	1,54 g/cm ³

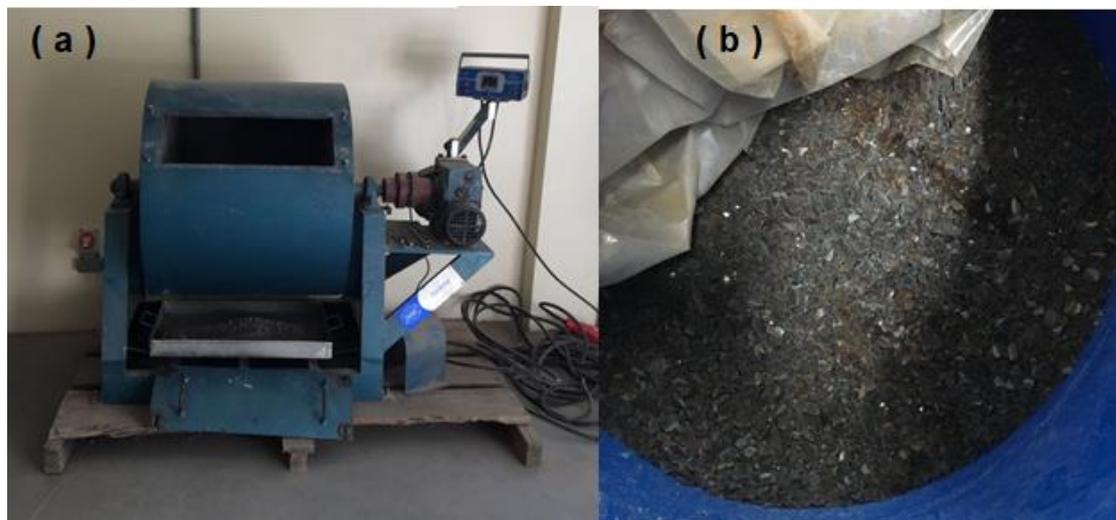
Fonte: Própria autora.

Entre os agregados selecionados para a pesquisa, o vidro é o único que precisou passar por um processo de moagem para atingir a granulometria desejada.

Para o processo de moagem do vidro foi utilizado um equipamento de moinho de bolas (Figura 6). O vidro foi inserido no tambor do equipamento juntamente com esferas metálicas para o seu fracionamento. O equipamento foi acionado por um período de 15 minutos. Após esse processo, o vidro cominuído foi passado pelas peneiras 2,36 mm e 0,15 mm. O material retido na

peneira 2,36mm e o material passante na peneira de 0,15 mm foram descartados, a fim de manter uma granulometria semelhante à de uma areia natural.

Figura 6 - Moinho de bolas (a) e Vidro parcialmente moído (b)



Fonte: Própria autora.

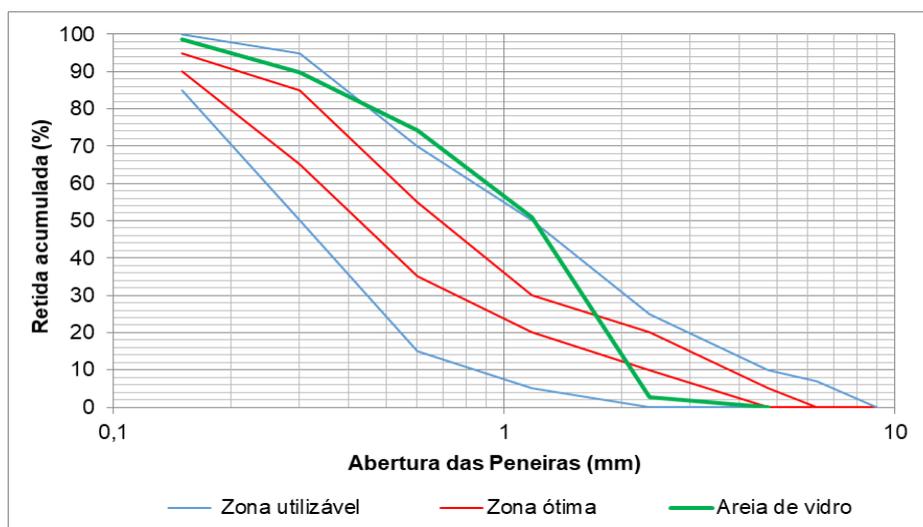
O ensaio de granulometria do vidro foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e está apresentado na Tabela 2 e Figura 7.

Tabela 2 – Ensaio de granulometria da areia de vidro

Peneiras		Amostra 1	Amostra 2	% Retida	% Retida Acumulada Média	Modulo de Finura
(mm)	Número	(Gramas)	(Gramas)	Média		
4,75	Nº 4	0	0	0,00	0,00	0,00
2,36	Nº 8	16,1	14,1	3,02	3,02	3,02
1,18	Nº 16	226	240,5	46,65	49,67	52,69
0,6	Nº 30	116,1	116,7	23,28	72,95	125,64
0,3	Nº50	85,3	77,1	16,24	89,19	214,83
0,15	Nº100	49	44,1	9,31	98,50	313,33
Fundo		7,5	7,5	1,50	100,00	
Total		500	500			
Diâmetro máximo					2,36 mm	
Módulo de Finura					3,13	

Fonte: Própria autora.

Figura 7 - Curva de distribuição da granulometria da areia de vidro.



Fonte: Própria autora.

De acordo com a classificação de nomenclatura da NBR 7211:2009 a areia de vidro se enquadrou como uma areia média. O ensaio de granulometria permitiu determinar, além da composição granulométrica dos grãos, o módulo de finura ($MF=3,13$) do material e o seu diâmetro máximo ($d_{max}= 2,36$ mm). Também foram realizados ensaios de massa específica, massa unitária e absorção de água, cujos valores estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Caracterização do vidro cominuído.

Ensaio	Normativa	Resultados
Massa Específica	NBR 9776:1987	2,54 g/cm ³
Massa Unitária	NM 45:2006	1,57 g/cm ³
Absorção de água	NM 60: 2001	4,98%

Fonte: Própria autora.

Para a produção dos concretos foi utilizado uma combinação de areia natural e areia de vidro (substituição parcial em massa de 20% de areia natural por areia de vidro). A composição granulométrica da mistura é mostrada na Tabela 3 e na Figura 8.

Tabela 3 – Ensaio de granulometria da composição areia natural e areia de vidro

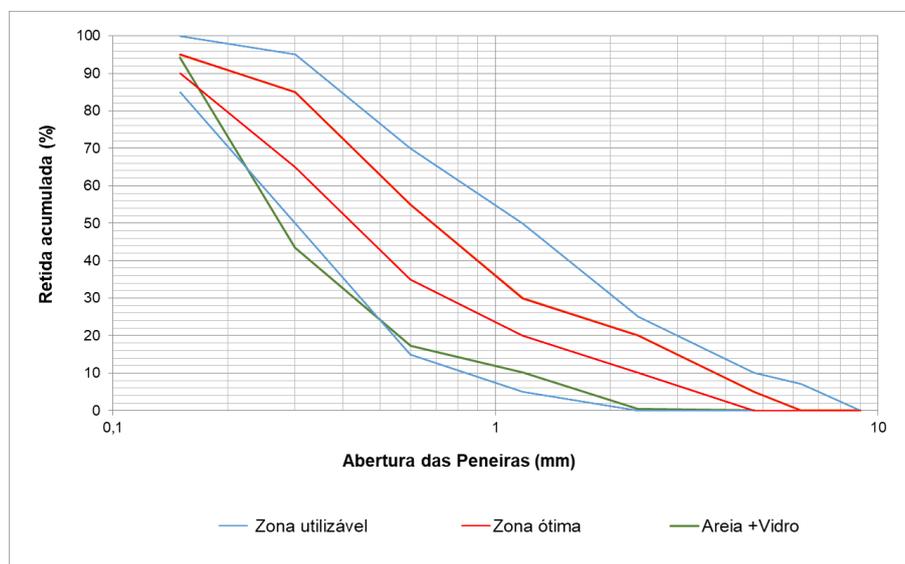
Peneiras		Amostra 1	Amostra 2	% Retida	% Retida Acumulada Média	Modulo de Finura
(mm)	Número	(Gramas)	(Gramas)	Média		
4,75	Nº 4	0,2	0	0,02	0,02	0,02
2,36	Nº 8	1,5	2,5	0,40	0,42	0,44
1,18	Nº 16	42,3	55,3	9,76	10,18	10,62
0,6	Nº 30	35,6	36,2	7,18	17,36	27,98
0,3	Nº 50	133,9	126,9	26,08	43,44	71,42
0,15	Nº 100	253,2	254,8	50,80	94,24	165,66
Fundo		33,3	24,3	5,76	100,00	
Total		500	500			

Diâmetro máximo 2,36mm

Módulo de Finura 1,66

Fonte: Própria autora.

Figura 8 - Curva de distribuição da granulometria da mistura (areia natural com substituição de 20% por areia de vidro)



Fonte: Própria autora.

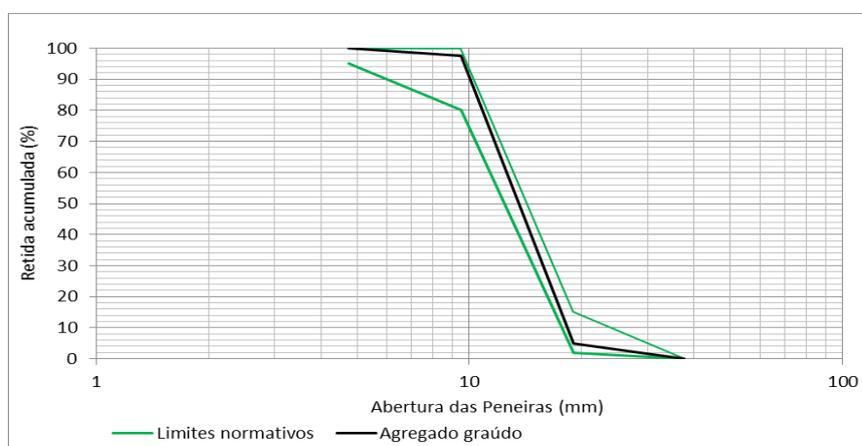
A Figura 8 mostra que o vidro cominuído usado na substituição de 20% da areia natural promoveu uma aproximação maior da curva do limite inferior recomendado por norma, entretanto essa distribuição ainda não entrou

na zona utilizável. Além disso, a mistura proporcionou um aumento no módulo de finura em 37,2% em relação à da areia e uma redução de 88,55% em relação à do vidro.

3.2.3 Caracterização dos Agregados Graúdos

O ensaio de granulometria da brita foi realizado de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e está apresentado na Figura 9 e no Apêndice B.

Figura 9 - Curva de distribuição da granulometria da brita.



Fonte: Própria autora.

Para a brita, o módulo de finura obtido na caracterização deste é de 7,02 e o diâmetro máximo é de 19 mm. A massa específica, a massa unitária e a absorção de água da brita está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4- Caracterização da brita.

Ensaio	Normativa	Resultados
Massa Específica	NBR 9776:1987	2,84 g/cm ³
Massa Unitária	NM 45:2006	1,53 g/cm ³
Absorção de água	NM 60: 2001	0,72%

Fonte: Própria autora.

3.3 Etapa – 2: Produção, Pré-carregamento e Cura dos Concretos

Conforme já relatado, o desenvolvimento do Programa Experimental contou com a produção de dois traços (Tabela 5). Um dos traços foi chamado de Traço de referência (Traço 01), por ser composto por 100% de agregado miúdo natural. Este traço apresentou um consumo de cimento de 417 kg/m^3 , e foi dosado para atingir uma resistência de aproximadamente 35 MPa aos 28 dias. O outro traço (Traço 02) foi produzido com substituição parcial em massa de 20% do agregado miúdo por vidro cominuído.

Tabela 5 – Traço unitário em massa Traço 01 e Traço 02

Traço	Cimento	Areia Natural	Areia de vidro	Brita	Aditivo (%)	a/c
01	1	1,64	0	2,86	0,15%	0,45
02	1	1,31	0,33	2,86	0,15%	0,45

Fonte: Própria autora.

Após a produção dos concretos foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, de acordo com a norma NM 67 (ABNT, 1998). Esse ensaio resultou em 15 centímetros e para o traço de referência (Figura 10) e 14 centímetros para o traço com vidro.

Figura 10 - Ensaio de abatimento do traço de referência



Fonte: Própria autora.

Após a determinação da consistência, os corpos de prova foram moldados e determinados a propriedade de massa específica dos concretos no estado fresco. No dia seguinte a produção dos concretos, foram desmoldados os corpos de prova e determinada a propriedade de massa específica no estado endurecido, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Densidade média no estado fresco e no estado endurecido

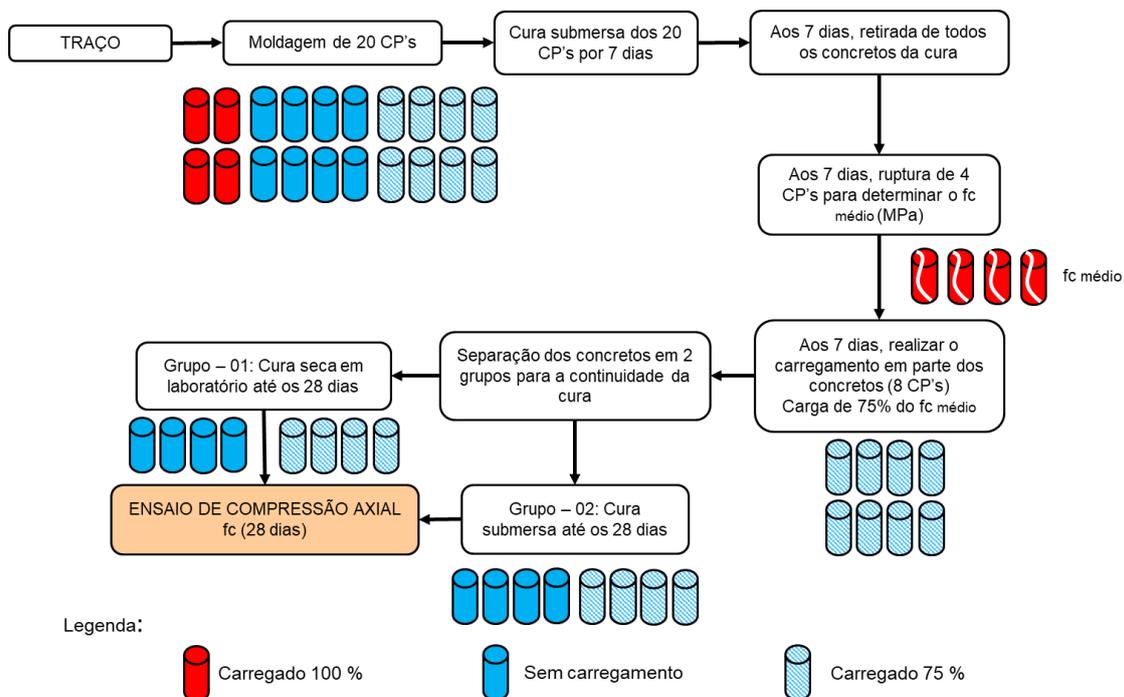
Tipo de Concreto	Densidade média (Kg/m ³)	
	Estado Fresco	Estado Endurecido
Sem vidro	2475,11	2451,40
Com vidro	2414,57	2394,58

Fonte: Própria autora.

A densidade do concreto no estado fresco é maior que a do estado endurecido (Tabela 6), isso ocorre devido à perda de água inicial do concreto para o ambiente durante o seu processo de endurecimento.

Na Figura 11 está apresentado o detalhamento dos processos que foram realizados na Etapa 2 do Programa Experimental para cada um dos traços produzidos (Traço de referência e Traço com vidro cominuído).

Figura 11 - Detalhamento da Etapa 2 do Programa Experimental por traço.



Fonte: Própria autora.

No estudo foram realizadas a moldagem de quarenta (40) corpos de prova (CP's) para dois traços (Figura 11). Um dia após a moldagem, os concretos foram identificados e acondicionados em cura submersa até a idade de sete dias. Nesta idade, foram rompidos oito corpos de prova até o limite, sendo metade de cada traço, e foi determinado a resistência média do concreto ($f_{c \text{ médio}}$). A partir deste valor ($f_{c \text{ médio}}$), foi calculado o percentual de 75% da carga de ruptura. Este percentual foi aplicado em parte das amostras (pré-carregamento) na idade de sete dias e serviu para induzir a microfissuração interna do concreto, importante para melhor avaliação do processo de autocura. Após o carregamento, para cada traço, parte dos CP's pré-carregadas e parte dos CP's sem carregamento foram acondicionados em cura submersa, enquanto as outras partes, desse mesmo traço, foram colocadas em cura seca em laboratório. Na idade de vinte e oito dias (28) foi encerrado o período de cura e as amostras tiveram suas propriedades mecânicas avaliadas (Figura 12).

Figura 12 – Corpos de prova, aos 28 dias, prontos para serem rompidos.



Fonte: Própria autora.

A temperatura da cura seca em laboratório não foi controlada diariamente, porém os dados foram levantados pelo INMET. No período do dia 25 de novembro de 2021 até 16 de dezembro de 2021, a temperatura média variou entre 17 e 29 graus e a umidade relativa do ar média foi de 65,5%, como mostrado no Anexo A.

Segundo Bauer (2015), a cura do concreto precisa ser realizada para que não ocorra a evaporação da água que foi adicionada no composto e que serve para hidratar o cimento, além disso essa fase ajuda a reduzir o acontecimento de fissuras por retração e beneficia na resistência do concreto. O tipo de cura mais comum é a cura úmida ou cura submersa, que consiste em deixar o concreto saturado por 28 dias. Entretanto, quando se concretiza uma estrutura, é difícil ter uma cura com o concreto submerso na água. Por isso, ainda existe a cura seca na qual é uma fase que o concreto recém desformado fica exposto ao intemperismo físico e químico sem sofrer algum esforço (DINIZ *et al*, 2015).

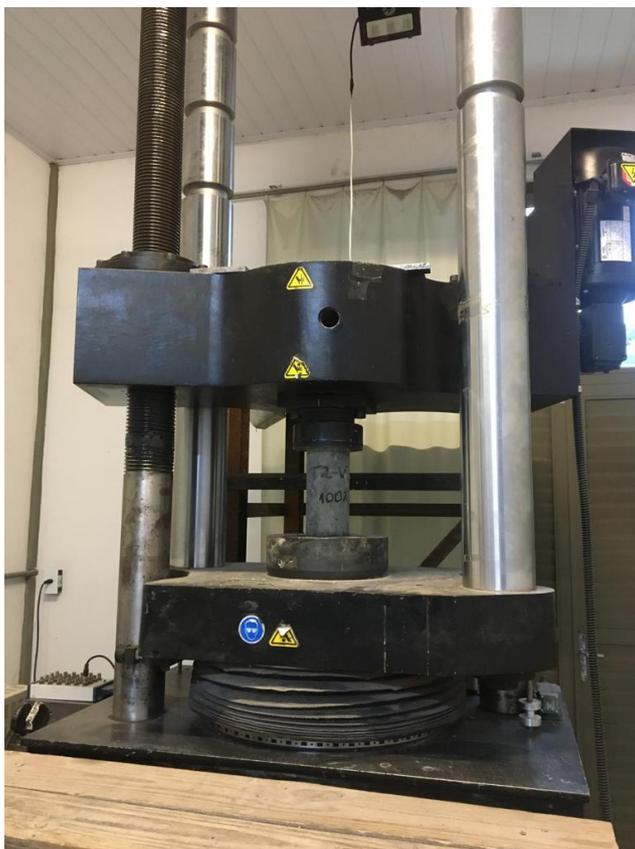
A partir do início da cura, o concreto ou a argamassa podem sofrer alguns danos, como a presença de fissuras devido a retirada de escoras ou da desforma precoce (antes do tempo recomendado), ação que fragiliza a estrutura e que pode influenciar nas propriedades mecânicas e de durabilidade. Entretanto, nesse compósito pode ocorrer um processo chamado de autocicatrização ou self-healing, que permite que o concreto se regenere com o passar do tempo quando estiver exposto a água (ZWAAG, 2008). Esse fenômeno ocorre, pois, os grãos anidros do cimento entram em contato com a água e se hidratam, ocorrendo um aumento no volume, fechando a fissura (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

3.4 Etapa – 3: Ensaios de Controle – resistência à compressão axial

Os ensaios de controle para avaliação das propriedades mecânicas de resistência à compressão axial foram iniciados após 28 dias.

A resistência mecânica dos concretos foi avaliada de acordo com o estabelecimento pela ABNT NBR 5739 (2018). Para este ensaio, foi utilizado uma velocidade 1,2 mm/min (Figura 13).

Figura 13 – Ensaio de resistência à compressão em 100% do carregamento do traço com vidro



Fonte: Própria autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão mostrados e discutidos os resultados das propriedades mecânicas dos concretos produzidos, os quais foram submetidos a pré-carregamentos nas primeiras idades e submetidos a diferentes processos de cura.

4.1 Pré-carregamento dos Concretos

Para o desenvolvimento do estudo da autocicatrização de concretos (detalhado no tópico 3.2.2), parte dos concretos precisaram ser submetidos a um processo de carregamento de compressão de intensidade de 75% da carga de ruptura aos 7 dias. Após a indução de microfissuras, os concretos foram submetidos a distintos processos de cura até a idade de 28 dias, quando foram avaliados quanto as suas propriedades mecânicas.

Para a determinação deste carregamento, aos sete dias foram rompidos até o limite quatro (4) corpos de prova por traço, os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Resistência à compressão axial dos concretos aos 7 dias

Identificação dos CPs	Resistência (MPa)	
	Traço de referência	Resistência com vidro
1	36,09	28,80
2	40,81	37,58
3	39,99	36,94
4	36,51	32,35
Média	38,35	33,92
Pré Carregamento - 75%	28,76	25,44

Fonte: Própria autora.

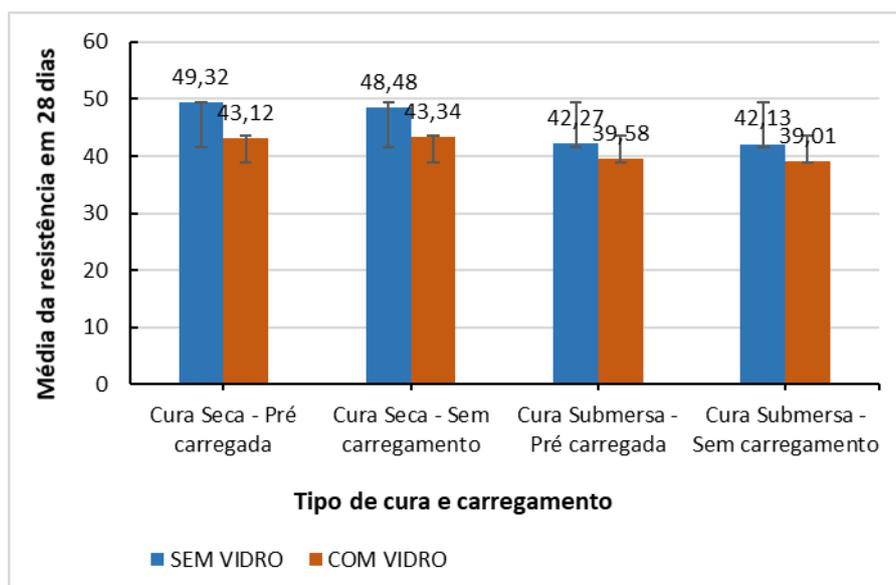
Para cada traço foi realizado o cálculo da resistência média à compressão. Os valores médios obtidos foram de 38,35 MPa para o traço de referência (sem vidro), e de 33,92 MPa para o traço com areia de vidro. Após esta etapa foi determinado o percentual de 75% sobre os resultados médios de cada traço e foram aplicados em parte dos concretos os carregamentos de compressão. Parte dos corpos de prova do traço de referência receberam um pré-carregamento de compressão no valor médio de 28,76 MPa e parte dos

concretos do traço com vidro cominuído receberam um pré-carregamento de compressão de 25,44 MPa. Após este procedimento os corpos de prova foram submetidos a distintos tipos de cura por um período de 28 dias (conforme dissertado no tópico 2.2), quanto as propriedades mecânicas de compressão foram avaliadas.

4.2 Resistência à compressão axial

Na idade de 28 dias, após findar o processo de cura dos concretos realizou-se o rompimento total de todos os corpos de prova para avaliação da propriedade mecânica de compressão, e os resultados estão mostrados na Figura 14.

Figura 14 - Média das resistências aos 28 dias (MPa)



Fonte: Própria autora

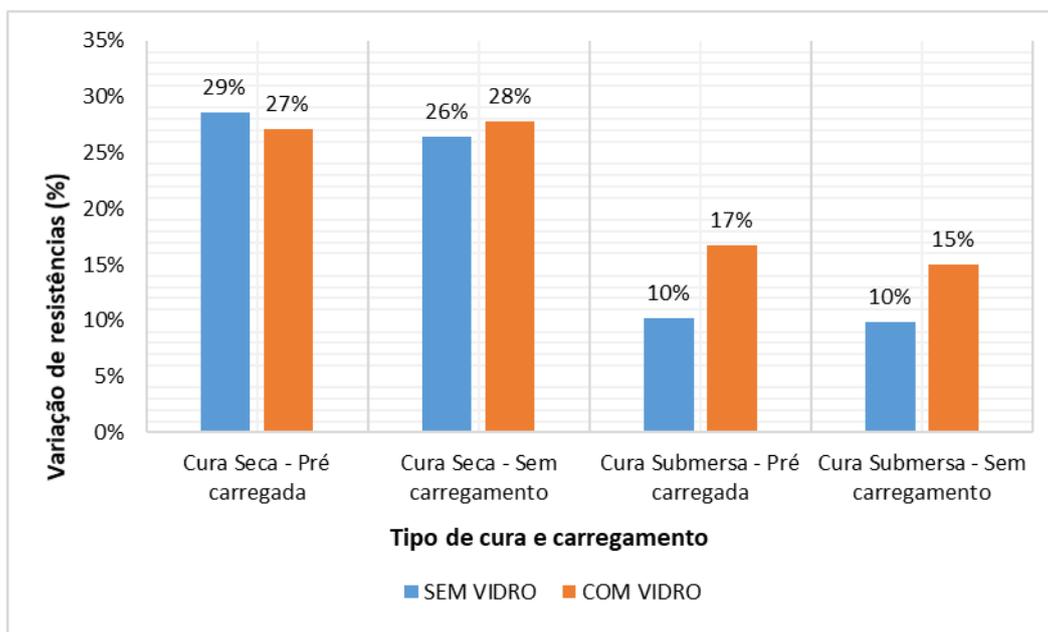
A Figura 14 mostra que todos os concretos apresentaram resistência à compressão axial superior a 39 MPa para a idade de 28 dias, confirmando a sua classificação como concreto estrutural. Observa-se que, em geral, os corpos de prova que foram pré-carregados aos sete dias mostraram um pequeno aumento na resistência mecânica em relação aos concretos sem carregamentos.

Analisando os resultados de resistência em função do tipo de cura (Figura 14), observa-se que a variável “tipo de cura” pode ter influenciado de forma importante a propriedade avaliada. Os traços submetidos ao processo de cura seca apresentaram valores de resistência à compressão axial superiores aos concretos submetidos a cura submersa. Alguns autores que trabalharam com concretos, como Souza, Paes e Barboza (2020), Perez (2015), Lima *et al* (2019) e Saraiva (2018), observaram valores de resistência à compressão na cura seca ao laboratório um pouco maiores do que a cura úmida para a idade de controle de 28 dias. No entanto, como essas diferenças foram mínimas, os autores não citam o motivo dessa ocorrência.

A Figura 14 também mostra que o traço de referência apresentou melhor desempenho mecânico do que o traço com vidro. Polley *et al.* (1998) e Sacco (2019) estudaram concretos com vidro cominuído com granulometria de 0,075 mm e observaram que a resistência destes concretos foi mais elevada em comparação aos concretos produzidos com areias de vidro com granulometria mais grosseira. Em função do exposto, acredita-se a queda de resistência dos resultados apresentados pelos concretos com vidro cominuído pode estar associada ao fato da granulometria do vidro não estar a mais adequada. O equipamento de moinho de bolas utilizado para adequação da granulometria do vidro apresentou problemas mecânicos durante o processo de trituração do material, impedindo a continuidade do processo de moagem.

Na Figura 15 está apresentado as porcentagens de variação da resistência média dos 7 dias para os 28 dias para os traços investigados.

Figura 15 – Variação de resistência dos concretos com a idade (7 dias → 28 dias)



Fonte: Própria autora

A Figura 15 mostra que todos os traços apresentaram um crescimento da resistência à compressão axial com o passar do tempo, como o esperado. As maiores variações de resistências (acima de 25%) foram observadas para os traços submetidos a cura seca. Para o traço de referência (sem vidro), o crescimento da resistência dos sete para os vinte e oito dias foi de 10% (tanto para os concretos pré-carregados, quanto para os concretos não submetidos ao carregamento). Para os traços com areia de vidro e submetidos a cura submersa, a variação da resistência foi de 17% e 15% nos pré-carregados e nos sem carregamento, respectivamente.

Para uma melhor análise e entendimento dos resultados, os dados coletados passaram por uma análise de variância (ANOVA), mostrado na Tabela 8. A partir de uma análise de variância (ANOVA), pode-se afirmar quais os fatores considerados (variáveis independentes) exerceram influência sobre a variável de resposta (resistência à compressão axial) em pelo menos um de seus níveis.

Tabela 8 - Avaliação estatística dos dados (ANOVA) para as misturas com cimento CPV RS.

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste - F	p	Significância
Intercepto	61875,17	1	61875,17	6394,139	0,000000	-
Teor de Vidro	186,95	1	186,95	19,320	0,000144	Sim
% carregamento	1,02	1	1,02	0,106	0,747274	Não
Tipo de cura	140,00	1	140,00	14,468	0,000710	Sim
Erro	270,95	28	9,68			

SQ- Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ- Médias Quadradas; p- significância.

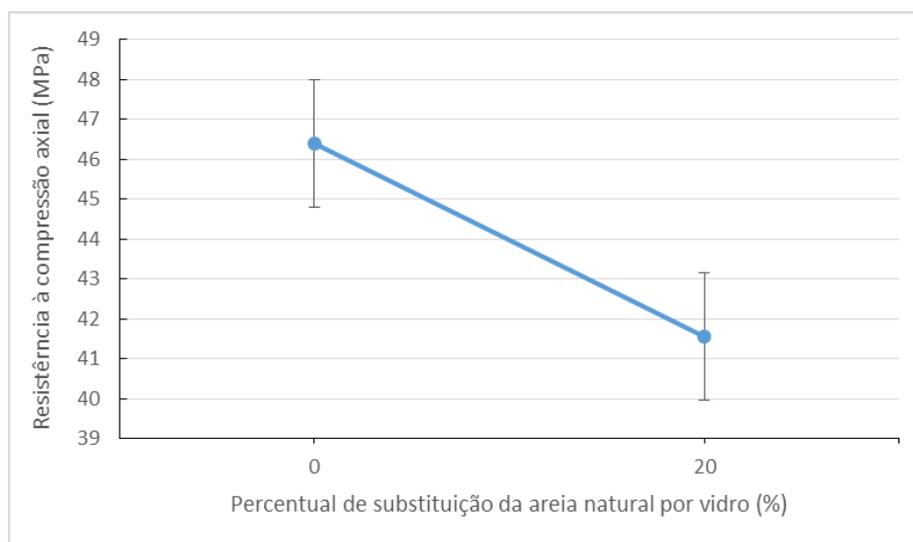
Fonte: Anova

Os dados da Tabela 8 indicam que entre as variáveis independentes estudadas, os fatores “teor de vidro” e o “tipo de cura” foram significativos isoladamente ($p < 0,005$). O valor $p < 0,05$ mostra que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95%. Em outras palavras, estes fatores apresentaram influência sobre a variável de resposta (resistência à compressão axial). O fator “% de carregamento” não se mostrou significativo, indicando que o pré-carregamento aplicado nas primeiras idades em parte dos concretos não interferiram de forma significativa no desenvolvimento da resistência. Ou seja, matematicamente não existe diferença entre os resultados de resistência à compressão axial obtidos para os traços não submetidos ao carregamento e para os traços submetidos ao carregamento para a propriedade avaliada. Segundo Vieira (2008), o pré carregamento dos concretos nas primeiras idades pode ter promovido um maior agrupamento dos cristais de etringita, tornando os concretos menos porosos e com mais resistência mecânica. Aliado a isso, pode ter ocorrido o fenômeno de autocatrização, devido os resultados dos corpos de prova com carregamento e os sem carregamentos serem semelhantes. No entanto, para a confirmação desse fenômeno seria preciso realizar outros ensaios complementares, como por exemplo, ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica e análise de microscopia. Bianchin (2018) concluiu em seu trabalho que a variação entre as resistências mecânicas de concretos microfissurados e não fissurados não foram significativas para a idade de 28 dias. Entretanto, para a idade de 56 dias, o autor observou que as resistências,

dos corpos de prova com carregamento foram mais elevadas. Com isso, concluiu que com o passar do tempo, o fenômeno de autocicatrização passa a ser mais perceptível.

As Figura 16 e Figura 17, obtidas a partir da análise ANOVA, apresentam o efeito isolado das variáveis “teor de vidro” e “tipo de cura”, no comportamento mecânico dos concretos, respectivamente.

Figura 16 - Efeito isolado do percentual de substituição do vidro na resistência à compressão axial.

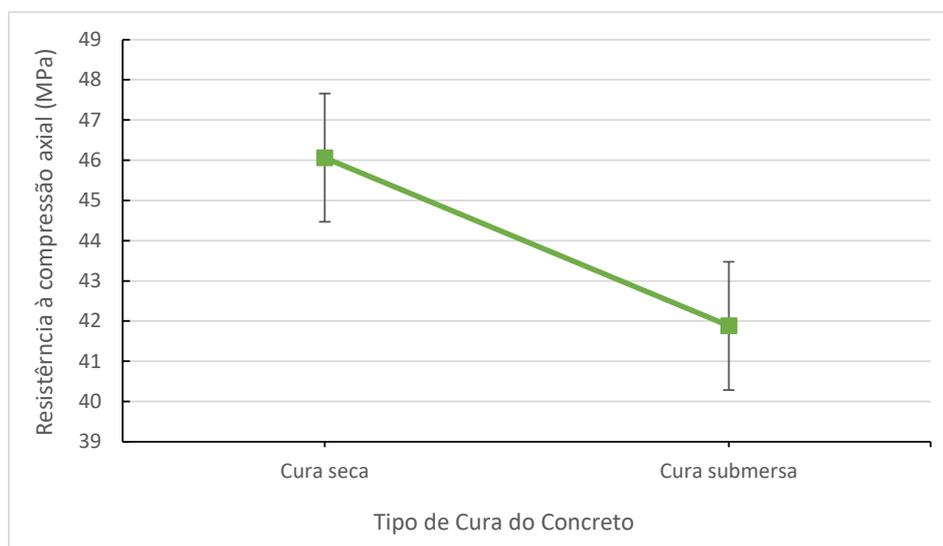


Fonte: Própria autora

O gráfico da Figura 16 mostra que a substituição parcial da areia natural dos concretos por areia de vidro promoveu uma redução significativa da resistência à compressão axial dos concretos. O efeito pozolânico do vidro não foi observado nos ensaios, uma vez que os concretos com areia de vidro apresentaram desempenhos mecânicos inferiores aos dos concretos de referência, tanto para os traços sem carregamento quanto para os traços pré-carregados. A ausência do efeito pozolânico do vidro pode ser associado ao fato da granulometria do vidro estar maior do que a recomendada pela literatura, conforme já dissertado (POLLEY *et al.*, 1998 e SACCO, 2019). De acordo com Sacco (2019), quando a areia de vidro é mais fina, ela tem uma superfície específica e, conseqüentemente, há mais áreas de contato que permitem que ocorra as reações pozolânicas. Outro fato que deve ser mencionado e que pode explicar a redução da resistência dos concretos com

vidro são expostos por Polley *et al.* (1998), Meyer e Xi (1999), Miranda Junior *et al.* (2012), Mehta e Monteiro (2014), Rollim (2019). Os autores explicam que a redução da resistência mecânica dos concretos com vidro cominuído pode ocorrer, pois a ligação entre o vidro e a pasta é menor, deixando um ponto de fragilidade no concreto. Segundo os autores, quando a granulometria do agregado miúdo é mais elevada, o índice de vazios será maior e o concreto será mais poroso, dessa forma, a resistência à compressão poderá ser menor.

Figura 17 - Efeito isolado do tipo de cura na resistência à compressão axial.



Fonte: Própria autora

O gráfico da Figura 17 mostra que o tipo de cura na qual os concretos foram submetidos influenciaram de forma significativa a resistência à compressão axial na idade de 28 dias. Diferente do esperado, as amostras submetidas a cura em ambiente de laboratório apresentaram as maiores resistências. Neville (2016) relata que se a umidade dentro do concreto, que é cerca de 80%, não for perdida, há continuação da hidratação e assim o concreto irá adquirir uma boa resistência à compressão. Com isso, pode-se sugerir que a ocorrência da resistência de cura seca em laboratório foi devido a permanência da umidade interna dos corpos de prova, pois o ambiente de laboratório onde os CP's foram acondicionados era fechado, ou seja, sem influência externa. Outro fator que pode ter influenciado no aumento da resistência à compressão axial nos corpos de prova submetidos à cura seca

em laboratório é a umidade do ambiente. Os dados de temperaturas máximas e mínimas e a umidade relativa do ar estão apresentados no Anexo A. Essas informações são do dia 25 de novembro de 2021 até 16 de dezembro de 2021, período que foi realizado o ensaio, e mostram que a temperatura média nesses dias variou entre 17 e 29 graus e a umidade relativa do ar média foi de 65,5%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento de quarenta corpos de prova divididos em dois traços distintos – referência e com vidro cominuído em substituição parcial de 20% em massa do agregado miúdo. Reforça-se que as conclusões aqui apresentadas se limitam aos materiais e métodos utilizados neste estudo.

Diante da metodologia, foi observado que o pré carregamento não apresentou influência na resistência à compressão axial dos concretos de forma significativa. Os resultados podem ser justificados em parte ao tipo de cimento utilizado. O CP V ARI é um cimento com granulometria fina, o que auxilia na autocicatrização do concreto. Dessa forma, tanto os corpos de prova que receberam o carregamento, quanto os que não receberam, sofreram a ação da cicatrização independentemente do tipo de cura, mantendo as resistências equivalentes dentre eles. Além do exposto, o pré carregamento dos concretos nas primeiras idades (tanto para o traço de referência quanto para o traço com vidro), pode ter promovido um maior agrupamento dos cristais de etringita, tornando os concretos menos porosos e com mais resistência mecânica.

Em relação aos traços, os concretos de referência apresentaram valores de resistência maiores que os concretos com incorporação de vidro. Esses resultados podem ser justificados, entre outros fatores, devido ao fato do vidro não estar na granulometria ideal para o favorecimento das reações pozolânicas.

Entretanto notamos que, o teor de vidro na porcentagem de 20%, promoveram uma queda na resistência mecânica dos concretos em comparação à mistura de referência, porém, apesar dessa redução, as resistências se mantiveram acima do recomendado pela norma NBR 5733 (ABNT, 1991).

Em relação ao tipo de cura, o ensaio de resistência à compressão axial mostrou que o tipo de cura aplicado nos concretos apresentou influência na propriedade avaliada. Os melhores desempenhos mecânicos foram observados para as amostras curadas em ambiente de laboratório. Acredita-se que os resultados podem estar associados ao fato da umidade do ar

permanecer mais elevada durante o experimento, minimizando a evaporação da água interna dos CP's. Entretanto não foi possível comprovar essa justificativa, sendo necessário novos estudos para a validação dos resultados.

6 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Diante do caso estudado, sugere-se para trabalhos futuros a serem desenvolvidos:

- Replicar este trabalho adequando a granulometria do vidro às recomendadas pela literatura;
- Avaliar a resistência à compressão para diferentes tipos de cimento
- Avaliar a resistência à compressão para diferentes valores de relação a/c.
- Avaliar a influência da cura térmica em concretos com vidro.
- Realizar o ensaio de microscopia para ver os fechamentos das fissuras
- Replicar este trabalho realizando a substituição de cimento ou brita por vidro.
- Avaliar a utilização de vidro em argamassas

REFERÊNCIAS

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automotivas de Vidro. 2019. Disponível em: <<https://abividro.org.br/2019/02/07/vidro-o-residuo-infinitamente-reciclavel/>>. Acesso em 26 jun. 2021.

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automotivas de Vidro. [s.d.]. Disponível em: <<https://abividro.org.br/beneficios-da-reciclagem-do-vidro/>>. Acesso em 18 ago. 2021.

ABRAVIDRO - Associação Brasileira de Distribuidores e Processadores de Vidros Planos. 2020. Disponível em: <https://abravidro.org.br/wp-content/uploads/2020/06/panorama_abravidro_2020_mobile.pdf>. Acesso em 30 jun. 2021.

ACI COMMITTEE. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. 2008

ADAWAY, Matthew; WANG, YJEJOSE. Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete—Effects on compressive strength. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v. 14, n. 1, p. 116-122, 2015.

ANAVIDRO. Associação Nacional de Vidraçarias. 2013. Disponível em: <<https://www.anavidro.com.br/saiba-como-funciona-a-reciclagem-do-vidro/>>. Acesso em 18 ago. 2021

ANGULO, Sérgio C.; FIGUEIREDO, AD de. Concreto com agregados reciclados. **ISAIA, GC Concreto: ciência e tecnologia. São Paulo: Arte Interativa**, 2011.

ARMELLINI, C.; FERNANDES, D. UTILIZAÇÃO DA SUCATA DE VIDRO PARA A PRODUÇÃO DE NOVOS PRODUTOS. **Trabalhos da 48a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de cerâmica**, p. 03. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento concreto. Rio de Janeiro, 2014.

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

BENATTI, Larissa Barbieri; DOS ANJOS AZAMBUJA, Maximiliano. Reciclagem de vidro como alternativa para concreto. **Revista nacional de gerenciamento de cidades**, v. 4, n. 26, 2016.

BIANCHIN, Felipe Hirata. Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades. 2018.

BONIĆ, Zoran et al. Some methods of protection of concrete and reinforcement of reinforced-concrete foundations exposed to environmental impacts. **Procedia Engineering**, v. 117, p. 419-430, 2015.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

BRITEZ, Carlos et al. Estanqueidade de lajes de subpressão. Caso MIS-RJ. **Rev. IBRACON Estrut. Mater.[online]**, v. 7, n. 6, p. 913-921, 2014.

CANEDO, Aline Crispim; BRANDÃO, Fernando Buiate; PEIXOTO FILHO, Fernando Luiz. Reaproveitamento de resíduo de construção na produção de argamassa de revestimento. (Trabalho de conclusão de curso Engenharia Civil) Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2011. Disponível em: <https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/140/o/REAPROVEITAMENTO_DE_RES% C3%8DDUO_DE_CONSTRU% C3%87% C3%83O_NA_PRODU% C3%87% C3%83O_DE_ARGAMASSA_DE_REVESTIMENTO.pdf>. Acesso em 23 jul. 2021.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton. Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos. 2018.

CARHUAYANO, Morales; ROBERTO, Miller. Estudio del comportamiento del concreto incorporando PET reciclado. 2016.

CARVALHO, Espedito Felipe Teixeira de. O concreto sem mistérios. Editora UFOP. 2012

CENCI, Charles Severo. Estudo da viabilidade técnica da utilização de vidro cominuído na produção de blocos de concreto para pavimentação. 2019.

DA SILVA RODRIGUES, Nara Caroline et al. Fibra de PET na produção de concretos. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 207-211, 2018.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. 1988.

DE ROOIJ, Mario et al. (Ed.). **Self-healing phenomena in cement-Based materials: state-of-the-art report of RILEM technical committee 221-SHC: self-Healing phenomena in cement-Based materials**. Springer Science & Business Media, 2013.

DESHPANDE, Swapnil Suresh. **Evaluating free shrinkage of concrete for control of cracking in bridge decks**. University of Kansas, 2007.

DINIZ, Hugo Alessandro Almeida et al. Influência da cura por imersão em concretos convencionais. **TECNOLOGIA & INFORMAÇÃO-ISSN 2318-9622**, v. 2, n. 3, p. 17-27, 2015.

DOS SANTOS, DIOGO PEREIRA. INFLUÊNCIA DO RESÍDUO DE VIDRO NAS PROPRIEDADES DE UMA ARGAMASSA COLANTE. 2016.

EDVARDESEN, C. K. Water permeability and self-healing of through cracks in concrete. **DAfStb Bull**, v. 455, 1996.

EDVARDESEN, Carola. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. In: **Innovation in concrete structures: Design and construction**. Thomas Telford Publishing, 1999. p. 473-487.

ENBRI. Development of a framework for environmental assessment of building materials and components (ENBRI Proposal to European Community BRITE EURAM Program). [S. l.]: ENBRI, 1994

FERRARI, G.; JORGE, J. *Materiais e Tecnologias*. São Paulo: Universidade Bandeirantes. (Notas de aula). [s.d.]. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/apostila-de-materiais-e-tecnologias/4715624/>.

Acesso em 25 ago. 2021

FONSECA, Jhonata Alves; PIOVESAN, Jayne Carlos; LOPES, Raduan Krause. A UTILIZAÇÃO DO VIDRO COMO MATERIAL POZOLÂNICO PARA O CONCRETO. **Revista Diálogos: Economia e Sociedade (ISSN: 2594-4320)**, n. 1, p. 21-38, 2019.

FRAGMAQ. Descubra quais os tipos de vidros são recicláveis. 2016. Disponível em: <https://www.agmaq.com.br/blog/ descubra-tipos-vidros-sao-reciclaveis/>. Acesso em 17 ago. 2021

GHOSH, Swapan Kumar (Ed.). **Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications**. Weinheim: Wiley-vch, 2009.

GJØRV, Odd E. Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. **São Paulo, Oficina de Textos (Supervisão Paulo Helene e Enio Pazini Figueiredo)**, p. 240, 2015.

GUPTA, Souradeep; DAI PANG, Sze; KUA, Harn Wei. Autonomous healing in concrete by bio-based healing agents—A review. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 419-428, 2017.

HELENE, Paulo; DA SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto. Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 2, 2011.

HIGUCHI, Adma Magni Darwich et al. Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho. 2018.

HUANG, Haoliang; YE, Guang; PEL, Leo. New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests. **Materials and Structures**, v. 49, n. 7, p. 2509-2524, 2016.

JENSEN, Ole Mejlhede; HANSEN, Per Freiesleben. Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. **Cement and concrete research**, v. 31, n. 4, p. 647-654, 2001.

KAEFER, Luís Fernando. A evolução do concreto armado. **São Paulo**, v. 43, 1998.

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.

KISHI, T. Self healing behaviour by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent. In: **First International Conference on Self Healing Materials, Noordwijk, The Netherlands, 2007. 4.** 2007.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001.

LIMA, Daniel Ferreira et al. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE CURA NO CONCRETO LEVE COM PÉROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO-EPS. **ITEGAM-JETIA**, v. 5, n. 18, p. 128-131, 2019.

LIMA, JAR de. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. **São Carlos**, v. 240, 1999.

LIMA, Daniel Ferreira et al. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE CURA NO CONCRETO LEVE COM PÉROLAS DE POLIESTIRENO EXPANDIDO-EPS. **ITEGAM-JETIA**, v. 5, n. 18, p. 128-131, 2019.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. Uso de vidro moído como agregado limita o concreto. **Cimento Itambe**. 2015. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/vidro-moido-como-agregado/>>. Acesso em 20 ago. 2021

LING, Tung-Chai; POON, Chi-Sun. A comparative study on the feasible use of recycled beverage and CRT funnel glass as fine aggregate in cement mortar. **Journal of cleaner production**, v. 29, p. 46-52, 2012.

LÓPEZ, D. A.; DE AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v. 51, p. 318-324, 2005.

MARTINS, Caroline. Saiba o que fazer com o seu resíduo de vidro. Trilho Ambiental. 2020. Disponível em:< <https://www.trilhoambiental.org/post/saiba-o-que-fazer-com-o-seu-residuo-de-vidro>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

MARTINS, IANNE SOUSA. ANÁLISE DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR VIDRO MOÍDO NO CONCRETO CONVENCIONAL. 2018.

MATOS, Ana Mafalda; SOUSA-COUTINHO, Joana. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and building materials**, v. 36, p. 205-215, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. Concreto-Microestrutura, Propriedades e Materiais, Ibracon. **São Paulo**, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2ª edição Brasileira. 4ª Edição em inglês. **São Paulo. Brasil**, 2014.

MENESES, Ilzenete Andrade. **Avaliação de concreto com adição de fibras de pet submetido a altas temperaturas**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

MEYER, Christian; XI, Yunping. Use of recycled glass and fly ash for precast concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 11, n. 2, 1999.

MIRANDA JR, E. J. P.; PAIVA, AEM. INFLUÊNCIA DOS RESÍDUOS VÍTREOS NAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND. 2012

MOREIRA, Mirellen Mara. Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento portland: contribuição aos processos de autocicatrização. 2016.

NASCIMENTO, Winny Fernanda et al. Caracterização de compósitos de concreto utilizando agregado miúdo do vidro. In: **XI Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, Poços de Caldas**. 2014.

NEVILLE, Adam M. Propriedades do Concreto-5ª Edição. Bookman Editora, 2016.

NEVILLE, Adam M. **Tecnologia do concreto**. Bookman Editora, 2013.

NOGUEIRA, Kelso Antunes. Reação álcali-agregado: diretrizes e requisitos da ABNT NBR 15577/2008. 2010.

OLIVEIRA, Aline Fernandes de. Materiais de Construção. 2010. Disponível em: <https://notedi2.files.wordpress.com/2010/06/aula-mc-04_-pozolana_escoria.pdf>. Acesso em 10 ago. 2021

OLIVEIRA, Tiago César Miranda de. Estudo dos efeitos da incorporação do resíduo de vidro temperado como agregado graúdo no concreto de cimento Portland. 2019.

PAIVA, Otávio Augusto et al. Resíduo Industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland. 2009.

PAZ, Mário Arlindo da Silva et al. Caracterização dos agregados graúdos da Grande Florianópolis e sua utilização em concretos de alta resistência. 1998.

PELISSER, Fernando et al. Avaliação do desempenho de concreto reforçado com fibras de polietileno tereftalato (PET). 2002.

PEREIRA, Artur Henrique. **Avaliação da utilização de vidro comum como pozolana e avaliação da utilização de sucata de vidro temperado como agregado graúdo em concretos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

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

PEREZ, Elva Wendolyn Ramirez et al. Influência da idade e cura do concreto na resistividade elétrica. 2015.

POLLEY, C., CRAMER, S.M., CRUZ, R.V.D.L, 1998. Potential for using waste glass in Portland cement concrete. *J. Mater. Civil Eng.* 10 (4), 210 à 219.

REIS, C. N. S.; LEITE, M. B.; LIMA, P. R. L. Influence of the diameter of the bar and CDW content on the bond behavior of recycled reinforced concrete. In: **2nd International RILEM Conference on Progress on Recycling in the Built Environment, São Paulo**. 2009. p. 2-4.

RIGHI, Débora et al. Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas. **Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural, Rio de Janeiro**, v. 13, 2012.

RILEM Technical Committee 221 - Self-healing phenomena in cementbased materials (Comitê Técnico - Fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia).

RODRIGUES, Clarissa Ribeiro de Sá; FUCALE, Stela. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, v. 14, p. 99-111, 2014.

ROLLIM, Isabelle Vasconcelos et al. Avaliação da influência do resíduo de vidro utilizado como agregado miúdo nas propriedades do concreto. 2019.

SACCO, Rafael Luís. Influência do tamanho das partículas de resíduos de vidro moído na resistência e rigidez de misturas de solo-vidro moído-cal de carbureto. 2019.

SAGOE, K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. Guide Specification on Recycled Glass as Sand Replacement in Premix Concrete. 2001.

SARAIVA, Marco Antônio Caixeta. Análise da influência da cura na resistência à compressão do concreto. 2018.

SHAYAN, Ahmad; XU, Aimin. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and concrete research**, v. 36, n. 3, p. 457-468, 2006.

SHI, Caijun et al. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 5, p. 987-993, 2005.

SIMÕES, Lorena Jordoni. Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto. **Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico-Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Civil, Vitória**, 2013.

SOROUSHIAN, Parviz et al. 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.

SOUSA NETO, Luciano Moreira de et al. Utilização de resíduo de vidro moído como adição mineral para a produção de concreto autoadensável e de alto desempenho. 2014.

SOUZA, Beatriz Cordeiro de; PAES, Cássia Nayara dos Santos; BARBOZA, Lucas da Silva. Estudo do agregado graúdo reciclado de concreto como agente de cura interna. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, 2020.

SOUZA, Líria Alves de. "Tipos de vidros"; *Brasil Escola*. [s.d.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/tipos-vidros.htm>. Acesso em 17 ago. 2021

TER HEIDE, Nynke. Crack healing in hydrating concrete. **Delft University of Technology**, v. 12, p. 82, 2005.

TINOCO, Vinícius Navarro Varela et al. Revisão literária do uso de vidro moído como substituto do agregado miúdo no concreto. 2018.

VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele. Self-healing in cementitious materials—A review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013.

VIEIRA, Geilma Lima. Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento. 2008.

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

YANG, Yingzi; YANG, En-Hua; LI, Victor C. Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. **Cement and concrete research**, v. 41, n. 2, p. 176-183, 2011.

ZHONG, Wenhui; YAO, Wu. Influence of damage degree on self-healing of concrete. **Construction and building materials**, v. 22, n. 6, p. 1137-1142, 2008.

ZWAAG, Sybrand (Ed.). **Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science**. Dordrecht, The Netherlands: Springer Science+ Business Media BV, 2008.

APÊNDICE A – Planilha de ensaio de granulometria da areia natural

Peneiras		Amostra 1	Amostra 2	% Retida Média	% Retida Acumulada Média	Modulo de Finura
(mm)	Número	(Gramas)	(Gramas)			
4,75	Nº 4	0	0	0,00	0,00	0,00
2,36	Nº 8	1,1	1,2	0,38	0,38	0,38
1,18	Nº 16	5,6	4,6	1,70	2,08	2,47
0,6	Nº 30	5,6	6,7	2,05	4,13	6,60
0,3	Nº50	75,2	76,2	25,23	29,37	35,97
0,15	Nº100	186,2	186,2	62,07	91,43	127,40
Fundo		26,3	25,1	8,57	100,00	
Total		300	300			
Diâmetro máximo						0,6 mm
Módulo de Finura						1,27

Fonte: Própria autora.

APÊNDICE B – Planilha de ensaio de granulometria da brita

Peneiras		Amostra 1	Amostra 2	% Retida Média	% Retida Acumulada Média	Modulo de Finura
(mm)	Número	(Gramas)	(Gramas)			
75	3"	0	0	0	0	0
37,5	1 1/2"	0	0	0	0	0
19	3/4"	130	110	4,76	4,76	4,76
9,5	3/8"	2302,5	2370	92,71	97,47	102,23
4,75	Nº 4	82,5	45	2,53	100	202,23
2,36	Nº8	0	0	0	100	302,23
1,18	Nº16	0	0	0	100	402,23
0,6	Nº30	0	0	0	100	502,23
0,3	Nº50	0	0	0	100	602,23
0,15	Nº100	0	0	0	100	702,23
Fundo		0	0	0	100	802,23
Total		2515	2525	100	0	802,23
Diâmetro máximo						19 mm
Módulo de Finura						8,02

Fonte: Própria autora.

ANEXO A – Temperatura e umidade relativa do ar em Alegrete no período do ensaio.

Data	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Umidade relativa do ar (%)
25/11/2021	26,7	17,6	63,92
26/11/2021	26	16,8	72,13
27/11/2021	27,6	17	76,21
28/11/2021	23,7	20	86,96
29/11/2021	26,7	15,5	72,75
30/11/2021	28,5	14,5	61,63
01/12/2021	28,7	14,1	60,13
02/12/2021	27,7	16,2	59,58
03/12/2021	29,6	15,1	59,13
04/12/2021	30,7	17,1	64,08
05/12/2021	31,1	18,6	62,79
06/12/2021	30,2	17,9	60,17
07/12/2021	30,1	17,7	52,21
08/12/2021	30,5	16,3	53,42
09/12/2021	30,7	16,3	53,29
10/12/2021	31,1	16,5	55,75
11/12/2021	32,8	18,2	53,08
12/12/2021	36,2	18,7	63,42
13/12/2021	28,6	21,9	77,29
14/12/2021	23,9	18,2	89,00
15/12/2021	29,9	18,7	74,58
16/12/2021	30,3	18,9	68,96

Fonte: INMET