

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CARLOS EDUARDO KELLER BERTOLO

**ESTUDO DE CONCRETOS FABRICADOS COM AGREGADO RECICLADO E
FIBRAS DE POLIPROPILENO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

**Alegrete
2023**

CARLOS EDUARDO KELLER BERTOLO

**ESTUDO DE CONCRETOS FABRICADOS COM AGREGADO RECICLADO E
FIBRAS DE POLIPROPILENO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

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 Dornelles Venquiaruto.

**Alegrete
2023**

CARLOS EDUARDO KELLER BERTOLO

**ESTUDO DE CONCRETOS FABRICADOS COM AGREGADO RECICLADO E FIBRAS DE
POLIPROPILENO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**

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: 17 de janeiro de 2023..

Banca examinadora:

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - UNIPAMPA - Orientadora

Prof. Dr. ALISSON SIMONETTI MILANI - UNIPAMPA

Me. MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA - UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALISSON SIMONETTI MILANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 15:26, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/02/2023, às 19:21, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 05/02/2023, às 14:00, 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 **1045129** e o código CRC **BB1DDF20**.

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos, os quais sempre estiveram ao meu lado me apoiando e incentivando. Dedico também dedico este trabalho aos mestres, doutores e técnicos que me auxiliaram ao longo desta jornada e tornaram este trabalho possível.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela saúde e por todas as coisas boas vivenciadas nestes anos.

A Universidade Federal do Pampa por proporcionar a realização do sonho em cursar Engenharia Civil.

A minha orientadora, Prof. Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, pelo profissionalismo e competência, por ter aceitado me guiar ao longo desta etapa final do curso e por estar sempre ao meu lado me auxiliando e incentivando a oferecer o melhor de mim.

Aos membros da banca examinadora, prof. Dr. Alisson Simonetti Milani e ao Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira, por aceitarem avaliar e contribuir para o aprimoramento deste trabalho.

A minha mãe, Fabiana Marcon Keller, por me proporcionar a realização do sonho de cursar uma graduação, a qual nunca mediu esforços para me oferecer o melhor ao longo desses anos, sempre apoiando e incentivando as minhas escolhas. Agradeço também ao meu pai, Silvério Zanini Bertolo, por me apoiar, incentivar e dar suporte ao longo dessa jornada acadêmica.

Aos meus familiares, em especial minhas avós, Dorina Catarina Marcon Keller e Elaine Ana Zanini Bertolo, que como segundas mães, sempre incentivaram a buscar o melhor de mim e correr atrás dos meus sonhos. Agradeço também as minhas tias, tios e primos que de alguma forma sempre mandaram energias positivas e me auxiliaram no que fosse preciso.

Aos técnicos de laboratório, Marcelo de Jesus Dias de Oliveira e Raquel dos Santos Machado, por todo auxílio que me deram no laboratório para que este trabalho fosse desenvolvido com êxito.

Por fim, mas não menos importante, aos colegas e amigos que Alegrete me proporcionou graças a UNIPAMPA, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nos piores e melhores momentos desta jornada, em especial aos amigos Jaime Mombach, Rafael Tambara, Luíza Dotta, Victor Duarte, Lucas Tito e Luis Morales, desejo a todos muito sucesso, saúde e tudo de melhor que possa existir nesse mundo, que nossa amizade e companheirismo prevaleça ao longo dessa vida. Agradeço também aos amigos da minha cidade natal de longa data, Débora Machado, Iuri Lanes, Carlos Vinicius, que de longe sempre me apoiaram e me mandaram boas energias, muito obrigado a todos.

RESUMO

BERTOLO, C. E. K. **Estudo de concretos fabricados com agregado reciclado e fibras de polipropileno em situação de incêndio**. Orientadora: Simone Dornelles Venquiaruto. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2023.

Muitos resíduos gerados devido a mudanças no padrão de vida da população podem vir a tornarem-se materiais alternativos para fabricação de concretos, por vezes podendo não só promover um menor custo para produção do concreto, mas também acrescentar características positivas nas suas propriedades, mitigando danos ambientais e o acúmulo de alguns materiais residuais em aterros. Dentre os materiais alternativos que podem ser empregados ao concreto, tem-se o vidro de garrafas do tipo *long neck* como uma opção interessante, pois além de tratar-se de um material gerado em larga escala pelo setor industrial, não são retornáveis devido ao elevado custo do processo de reutilização. Desta forma, surge a possibilidade de explorar o vidro cominuído como um material alternativo, substituindo parcialmente a areia natural no processo de concretagem. Nesta pesquisa será investigado além das propriedades convencionais do concreto, o seu comportamento frente a situações adversas em que a sua estrutura pode ser submetida ao longo de sua vida útil, como é o caso de uma situação de incêndio. Além de favorecer a minimização do descarte do vidro, esta pesquisa visa colaborar com a redução dos danos causados pelas elevadas temperaturas em uma estrutura, através da incorporação de fibras de polipropileno na matriz de alguns concretos, as quais reduzem a possibilidade da ocorrência do fenômeno de *spalling*, típico de concretos em situação de incêndio. Foram avaliadas as propriedades mecânicas de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral, assim como absorção de água por capilaridade. Foram estudados quatro traços produzidos com cimento CP-IV 32RS, sendo o primeiro sem vidro e fibras (convencional), o segundo com 40% de vidro cominuído substituindo parcialmente a areia natural e fibras de polipropileno a uma taxa de 5 kg/m³, o terceiro sem adição de fibras (somente com 40% de vidro) e o quarto sem vidro (somente com fibras a uma taxa de 5 kg/m³). Previamente aos ensaios de resistência, parte dos corpos de prova foram aquecidos em mufla até atingirem uma temperatura de 600°C, onde permaneceram expostos a temperatura constante por 30 minutos, simulando uma situação de incêndio. Não foi visualizado *spalling* em nenhum dos traços estudados nas condições de aquecimento impostas, o que impossibilitou averiguar de forma direta a eficiência das fibras frente ao fenômeno. Os resultados da análise de variância realizada (ANOVA) mostraram que a taxa de 40% de vidro cominuído substituindo a areia natural não influenciou significativamente nos parâmetros de resistência e durabilidade analisados. A adição de fibras também não influenciou nos parâmetros de resistência, entretanto a durabilidade dos concretos pode ter sido afetada com a incorporação das mesmas, devido ao aumento mais expressivo na absorção de água dos concretos com fibras após exposição a 600°C. A temperatura mostrou-se uma variável significativa para todos os parâmetros investigados, pois ela influenciou significativamente na perda das propriedades mecânicas e no aumento da absorção de água nos traços estudados.

Palavras-Chave: Concreto, fibras, vidro, elevadas temperaturas.

ABSTRACT

BERTOLO, C. E. K. **Estudo de concretos fabricados com agregado reciclado e fibras de polipropileno em situação de incêndio**. Orientadora: Simone Dornelles Venquiaruto. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Curso de Engenharia Civil, Alegrete, 2023.

Numerous residues generated attributable to the changes in the population's standard of living may become alternative materials for concrete manufacture, occasionally these residues not only can lead to a lower cost of concrete production, but also add beneficial characteristics in its properties which may diminish the environmental damage and the accumulation of some residual materials in landfills. Amongst the alternative materials that can be used in concrete, there is glass from long neck bottles as a compelling choice once it is a material generated in a large scale by the industrial sector and not returnable because of the high cost of the reuse process. In this way, the possibility arises to explore crumbled glass as an alternative material by partially replacing natural sand in the production of concrete. In this research, it will be under study beyond its conventional properties, the behaviour of concrete in the exposé of adverse situations in which the concrete structure can be subjected throughout its useful life, for example, in a fire situation. In addition to be in favour of the minimization of glass disposal, this research aims to collab with the reduction of the harm caused by high temperatures in a structure through the incorporation of polypropylene fibres in the matrix of some concretes, which reduce the possibility of the spalling phenomenon befall, typical of concrete in a fire situation. The mechanical properties of resistance to axial compression and traction by diametrical compression, as well as water absorption by capillarity, were evaluated. Four mixes produced with CP-IV 32RS cement were studied, the first without glass and fibres (conventional), the second with 40% crumbled glass partially replacing natural sand and polypropylene fibres at a rate of 5 kg/m³, the third without adding fibres (only with 40% glass) and the fourth without glass (only with fibres at a rate of 5 kg/m³). Previously to the resistance tests, part of the specimens was heated in a muffle until they reached a temperature of 600°C, where they remained exposed to a constant temperature for 30 minutes, simulating a fire situation. The spalling phenomenon was not observed in none of the traits studied under the imposed heating conditions, which made it impossible to directly verify the efficiency of the fibres against the phenomenon. The results of the analysis of variance performed (ANOVA) revealed that the rate of 40% of crumbled glass replacing natural sand did not significantly influence the parameters of resistance and durability analysed. The addition of fibres also did not influence the strength parameters, however, the durability of the concretes may have been affected with the incorporation of fibres due to the more expressive increase in water absorption of concretes with fibres after exposure to 600°C. Temperature proved to be a significant variable for all investigated parameters, as it significantly influenced the loss of mechanical properties and increased water absorption in the studied mixes.

Keywords: Concrete, fibres, glass, high temperatures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Spalling</i> na estrutura de concreto.....	22
Figura 2 - Programa experimental.....	39
Figura 3 - Vidro moído utilizado.....	42
Figura 4 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos e da mistura	43
Figura 5 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo	44
Figura 6 - Fibras de polipropileno.....	45
Figura 7 - Detalhamento da Etapa 2 do Programa Experimental por traço	48
Figura 8 - Processo de aquecimento dos corpos de prova, onde: (a) Forno elétrico Fortelab utilizado; (b) Amostras expostas para aquecimento.....	49
Figura 9 - Prensa EMIC utilizada para realização dos ensaios de resistência: (a) À compressão; (b) À tração.	51
Figura 10 - Resistência média aos 7 e 28 dias de idade	53
Figura 11 - Resistência média aos 28 dias antes e após exposição a 600°C	54
Figura 12 - Efeito isolado da temperatura na resistência à compressão axial	56
Figura 13 - Resistência média aos 32 dias antes e após exposição a 600°C	57
Figura 14 - Efeito isolado da temperatura na resistência à tração por compressão axial.....	58
Figura 15 - Absorção média antes e após exposição a 600°C.....	59
Figura 16 - Efeito isolado da temperatura na absorção de água.....	61
Figura 17 - Efeito isolado da fibra de polipropileno	61
Figura 18 - Ascensão de água nos concretos após exposição a 600°C	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização física do agregado miúdo – Vidro moído.....	42
Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo – Areia natural.....	42
Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo.....	44
Tabela 4 - Caracterização das fibras de polipropileno	45
Tabela 5 - Traços unitários em massa	47
Tabela 6: ANOVA – Resistência à compressão axial de concretos	55
Tabela 7: ANOVA – Resistência à tração na compressão diametral	57
Tabela 8: ANOVA – Absorção de água por capilaridade	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Revisão de trabalhos científicos com fibras de polipropileno em matrizes cimentícias.	30
Quadro 2 - Revisão de trabalhos científicos com vidro cominuído em matrizes cimentícias.	37
Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos materiais	40
Quadro 4 - Caracterização do cimento CP-IV 32RS	41
Quadro 5 - Nomenclatura dos traços adotada.....	52

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CP – Cimento Portland

CP'S – Corpos de prova

NM – Norma Mercosul

NBR – Norma Brasileira

ANOVA – Análise de variância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos específicos.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	Concretos em situação de incêndio – Comportamento dos materiais	18
2.1.1	Água	18
2.1.2	Pasta.....	19
2.1.3	Agregados	19
2.2	Propriedades mecânicas dos concretos em situações de incêndio.....	20
2.3	Lascamento do concreto em elevadas temperaturas – spalling	21
2.4	Propriedades mecânicas de concretos com fibras de polipropileno submetidos a diferentes temperaturas	23
2.5	Propriedades mecânicas de misturas cimentícias com vidro cominuído	31
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	Etapa 1 - Caracterização dos Materiais.....	39
3.1.1	Cimento	40
3.1.2	Agregado Miúdo	41
3.1.3	Agregado Graúdo	43
3.1.4	Aditivo Superplastificante.....	44
3.1.5	Fibras de Polipropileno	45
3.1.6	Água	45
3.2	Etapa 2 - Produção e Cura dos Concretos.....	46
3.3	Etapa 3 - Ensaio de Controle.....	50
3.3.1	Absorção de água por capilaridade	50

3.3.2 Resistência à compressão axial	50
3.3.3 Resistência à tração por compressão diametral	50
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1 Resistência à compressão axial	52
4.2 Resistência à tração por compressão diametral.....	56
4.3 Absorção de água por capilaridade.....	58
4.4 Ascensão de água nos concretos	62
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
6 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....	66
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Lima *et al.* (2014) o concreto é o material mais utilizado na construção civil atualmente, seu uso é justificável devido a sua versatilidade, uma vez que em seu estado fresco permite ser moldado nas mais diversificadas formas e texturas, podendo exercer diferentes funções em uma edificação que variam de acordo com a necessidade exposta.

Os materiais empregados para produção do concreto têm origem de recursos naturais, sendo que muitos destes recursos vêm sendo explorados progressivamente, reduzindo significativamente a sua disposição no ambiente. O concreto é um dos únicos materiais que comumente é utilizado nas mais variadas obras de construção civil e que permite a utilização de materiais reciclados em sua mistura (OGUNDAIRO *et al.*, 2019).

O avanço tecnológico aliado ao processo de industrialização tem impactado diretamente na geração de resíduos industriais e urbanos de forma acelerada. Muitos destes resíduos acabam recebendo uma destinação final inadequada, fomentando danos ambientais e também ocupando grande espaço em aterros (GEYER, 2001).

Resíduos industriais ou urbanos podem se tornar materiais alternativos para fabricação de concretos, por vezes promovendo não só um menor custo para produção, mas também características positivas nas propriedades dos concretos, mitigando a destinação e acúmulo de alguns materiais em aterros, reduzindo danos ambientais. No Brasil, nota-se grande interesse por parte dos pesquisadores no reaproveitamento de resíduos para produção de concreto, uma vez que o tema vem sendo amplamente abordado em pesquisas nas diversas faculdades nacionais e seminários que englobam o assunto, comprovando e aprimorando cada vez mais a utilização de materiais alternativos incorporados ao concreto (LEVY, 2001).

Dentre os possíveis materiais alternativos que podem ser empregados ao concreto têm-se os resíduos de vidro como uma opção interessante, pois trata-se de um material gerado em grande escala pelo setor industrial e mesmo possuindo alto potencial de reciclagem, devido ao elevado custo conferido ao processo, muitos destes resíduos terminam sendo destinados à deposição incorreta em aterros e devido ao vidro ser um material não biodegradável, acabam por acelerar o processo

de superlotação destes locais, ocupando espaço de outros materiais que possuam real potencial de decomposição em aterros (OGUNDAIRO *et al.*, 2019).

Segundo pesquisa realizada pela Federação Europeia de Vidro de Recipiente - FEVE, as embalagens de vidro têm se tornado cada vez mais presente na vida dos consumidores, e dessa forma o descarte de resíduos de vidro cresce, com ênfase nas garrafas do tipo *long neck* muito difundidas na atualidade devido às mudanças no padrão de consumo da população (FEVE, 2020).

Diversas pesquisas ao longo dos anos (López *et al.* (2005); Righi *et al.* (2011); Braga e Ramos (2019); Costa *et al.* (2020); Pereira (2022); entre outros) tem avaliado o comportamento mecânico de concretos com incorporação de vidro cominuído. Muitas dessas pesquisas mostram resultados promissores quanto às propriedades mecânicas do concreto, dependendo do teor e da finura do vidro incorporado à mistura.

Entretanto, existem situações nas quais uma estrutura pode ser submetida durante sua vida útil que ainda são pouco exploradas, como é o caso de uma situação de incêndio. Logo, também se tornam necessárias análises criteriosas das propriedades de concretos com materiais alternativos frente a estas situações adversas. Segundo Righi *et al.* (2011), dependendo da magnitude do fogo, os sinistros causados por incêndios podem assolar as edificações colocando em risco sua integridade estrutural.

O objetivo de garantir a segurança de uma estrutura em situação de incêndio é de dar condições e tempo razoável para promover a evacuação dos ocupantes do edifício em chamas para um local seguro, limitando a probabilidade de lesões e mortes. Além disso, a estrutura deve proporcionar condições favoráveis para que os bombeiros operem no combate as chamas em segurança e que as pessoas na proximidade do edifício mantenham-se seguras, não sendo expostas ao possível colapso do edifício (BAILEY, 2004).

Com relação à segurança de uma edificação em situações de incêndio, estudos apontam que a incorporação de fibras de polipropileno na matriz dos concretos contribui para mitigar danos causados pelo acréscimo de temperatura, principalmente em elementos que possuam porosidade reduzida devido a concentrada presença de finos em sua composição (LIMA *et al.*, 2004).

Em função do exposto, esta pesquisa também utilizará fibras de polipropileno em parte dos concretos produzidos, objetivando a minimização dos danos nas propriedades mecânicas dos concretos submetidos ao fogo. A avaliação do comportamento mecânico de concretos produzidos com agregado reciclado (vidro cominuído) e com fibras de polipropileno frente à situação de incêndio contribuirá para um desenvolvimento mais abrangente sobre o tema, justificando a relevância dessa pesquisa. Além disso, a incorporação do vidro moído no concreto colaborará para a redução do descarte de um resíduo não biodegradável no ambiente, reduzindo impactos ambientais e aliviando o volume ocupado em aterros.

1.1 Objetivos

Os objetivos que nortearam o trabalho estão apresentados nos itens 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento de concretos convencionais (referência) e alternativos (com agregado miúdo de vidro cominuído) com e sem adição de fibras de polipropileno e submetidos à situação de incêndio.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades mecânicas (resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral) dos concretos produzidos;
- Avaliar o indicativo de durabilidade dos concretos produzidos através do ensaio de absorção de água por capilaridade;
- Avaliar o desempenho dos concretos com e sem fibras de polipropileno frente à situação de incêndio através do comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de controle.

- Avaliar se o teor de fibras de polipropileno nos concretos foi suficiente para minimização do *spalling*;
- Avaliar o desempenho dos concretos com e sem substituição parcial do agregado miúdo por vidro cominuído frente à situação de incêndio através do comparativo dos resultados obtidos nos ensaios de controle.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção (itens 2.1 a 2.5) foram dissertados os principais assuntos que deram embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Concretos em situação de incêndio – Comportamento dos materiais

O concreto possui propriedades atraentes do ponto de vista à resistência ao fogo, pois trata-se de um material incombustível, não emite gases tóxicos e mantém um bom desempenho durante um período relativamente grande em situações de incêndio, por possuir baixa condutividade térmica (NEVILLE, 2015).

Pancar (2017) explica que embora o concreto tenha excelentes propriedades frente à deterioração, quando exposto a elevadas temperaturas suas propriedades mecânicas decaem devido ao aquecimento.

As diferenças de comportamentos entre os materiais constituintes do concreto quando expostos a elevadas temperaturas causam enfraquecimento e até mesmo desagregação dos elementos, fazendo com que a macroestrutura do concreto sofra *pop outs* (pipocamentos) e/ou *spalling* (lascamentos) que dependendo da severidade de manifestação podem colocar em risco toda a estrutura, como é o caso da perda de massa devido ao lascamento, que promove a exposição de camadas do interior da estrutura ou até mesmo da armadura a ação direta do fogo (COSTA E SILVA, 2004).

2.1.1 Água

Existem diferentes tipos de água presentes na composição da pasta existente nas estruturas de concreto, sendo que alguns destes são rapidamente perdidos com o acréscimo de temperatura. Contudo, é necessário um calor de vaporização consideravelmente alto para transformação da água em vapor e a temperatura na estrutura de concreto exposta ao fogo não se elevará até que toda a água evaporável tenha sido expedida (METHA E MONTEIRO, 2008).

Lima *et al.* (2004) afirmam que a água livre e capilar presentes na matriz do concreto iniciam o processo de evaporação após a estrutura estar submetida a temperaturas maiores que 100°C, o que acaba retardando o acréscimo de

temperatura na estrutura de concreto. A evaporação da água capilar ocorre até a faixa de temperatura entre 200°C e 300°C, onde é completamente extinta.

2.1.2 Pasta

A pasta sofre desestruturação química na medida em que se eleva a temperatura devido à evaporação da água livre presente na mesma. Em concretos usuais saturados e principalmente em concretos de alta resistência, os quais possuem uma maior densidade quando endurecidos fomentando uma menor porosidade, a pressão de vapor gerada pode ultrapassar a capacidade de liberação pelos poros aumentando chance de a estrutura sofrer *spalling* (COSTA E SILVA, 2004).

À medida que a temperatura aumenta, a água presente na superfície do concreto e a água capilar são perdidas, este processo ainda é acelerado devido à redução das forças coesivas entre as moléculas de água devido a sua expansão. No momento em que o concreto atinge a temperatura na faixa dos 400°C, há uma aceleração na diminuição de sua resistência devido à degradação da fase ligante do concreto produzida a partir da hidratação do cimento Portland, composta por silicato de cálcio hidratado (C-S-H), sendo que a 900°C o C-S-H é completamente decomposto. Dessa forma, a temperatura entre 400°C e 900°C é considerada a mais crítica, onde o material perde a maior parte de sua resistência mecânica (PANCAR, 2017).

2.1.3 Agregados

A mineralogia e a porosidade do agregado utilizado são fatores que influenciam no comportamento de concretos em situação de incêndio. Agregados com alto teor de umidade e permeabilidade relativamente elevada tendem a sofrer expansões destrutivas, enquanto os agregados com baixa permeabilidade podem não sofrer estes problemas relacionados ao movimento da umidade interna (METHA E MONTEIRO, 2008).

O agregado quando aquecido expande, aumentando seu volume, causando retração na pasta que o envolve, com isso a ligação entre a pasta e o agregado enfraquece, tornando o ponto mais fraco do material quando aquecido. De fato, a

utilização de agregados com menores coeficientes de expansão térmica reduz esse efeito, promovendo uma maior durabilidade e segurança às estruturas em situações de incêndio. (PANCAR, 2017).

Neville (2015) relata que o tipo de agregado empregado ao concreto tem influência quando avaliado seu comportamento frente a elevadas temperaturas. O autor comenta que o uso de agregados com alto teor de sílica, como granito e arenito, aumenta a perda de resistência com o aquecimento quando comparado com outros agregados.

Com o efeito do aquecimento pode haver mudança na coloração dos concretos. Na maioria dos casos adquire uma cor rosa ou avermelhada quando atinge temperaturas a cima de 300°C, temperatura na qual o concreto começa a perder significativamente sua resistência à compressão residual, tornando a mudança de cor um prenúncio de alerta para concreto enfraquecido. Normalmente a mudança de cor é mais visível em concretos com agregados silicosos (INGHAN, 2009).

2.2 Propriedades mecânicas dos concretos em situações de incêndio

De acordo com Inghan (2009) a resistência mecânica de concretos estruturais após exposição ao fogo pode variar significativamente e depende de diversos fatores, tais como temperatura atingida, tempo de exposição, proporções da mistura, tipo de agregado empregado na mistura e carga aplicada durante o aquecimento. O autor afirma que até 300°C não há mudanças na resistência à compressão residual a ponto de comprometer a estrutura, todavia quando ultrapassada a temperatura de 300°C os danos podem ser severos, sendo que em temperaturas superiores a 500°C a resistência à compressão residual de concretos estruturais pode diminuir drasticamente a uma fração de sua resistência original.

Phan e Carino (2000) comentam que é evidente que os concretos reduzem suas propriedades mecânicas devido à ação térmica, sendo que em concretos de alta resistência (resistência característica de pelo menos 40 MPa) a perda é ainda mais acentuada. Para concretos de resistência moderada, a temperaturas de 300°C o concreto perde cerca de 10 a 20% de sua resistência à compressão característica, já em temperatura da ordem de 600°C ocorre perda entre 60 e 75% da sua resistência característica. Contudo, para concretos de alta resistência as perdas

podem chegar em 40% logo a temperaturas abaixo de 450°C. Os autores ainda ressaltam que também há perda no módulo de elasticidade devido à ação térmica e que essa perda se assemelha muito ao comportamento descrito para a resistência à compressão.

O módulo de elasticidade dos concretos é altamente afetado pelo acréscimo de temperatura, uma vez que ocorre a diminuição da aderência entre pasta e agregado na medida em que a água vai sendo expulsa do concreto com o aquecimento, entre cerca de 50°C e 800°C. Contudo, é difícil prever o comportamento exato frente à ação do fogo, pois estes são influenciados por uma série de fatores, como por exemplo, o tipo de agregado utilizado (NEVILLE, 2015).

Apesar de o módulo apresentar tendência geral de comportamento semelhante ao observado quanto à resistência a compressão, em temperaturas mais elevadas é necessária uma investigação mais criteriosa para determinar a velocidade com que esse decréscimo ocorre. Lima (2005) em seus estudos investigou o decaimento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de concretos expostos a elevadas temperaturas e aferiu que em temperatura de 400°C o fator de redução quanto a resistência a compressão ficou em torno de 0,87 e o equivalente quanto ao módulo foi de 0,77, contudo, em temperatura de 600°C, o decréscimo passou a ser de aproximadamente 0,26 para o módulo e 0,62 para resistência. A análise realizada pelo autor permite concluir que em temperaturas mais elevadas o processo de degradação do módulo de elasticidade ocorre mais rapidamente quando comparado com a resistência à compressão.

2.3 Lascamento do concreto em elevadas temperaturas – spalling

Diante situações onde a estrutura de concreto esteja exposta a elevação progressivas e rápidas de temperatura, como em um caso de incêndio, ocorrem transformações na micro e macroestrutura do concreto que causam diminuição de resistência, perda de rigidez e surgimento de novos esforços solicitantes devido a variações térmicas na estrutura. Estas transformações devido ao aquecimento geram mudanças físicas e químicas na estrutura, causando degeneração entre os elementos dispostos na matriz dos concretos, sendo que esse efeito ainda é intensificado pelos novos carregamentos oriundos da ação térmica, o que implica na estrutura o surgimento de fissuras, esfarinhamentos e lascamentos, sendo este

último conhecido internacionalmente como “*spalling*” (COSTA, FIGUEIREDO E SIVA, 2002).

A definição aferida por Gil *et al.* (2018) ao *spalling* consiste em fenômeno no qual ocorre deslocamento das camadas mais superficiais de elementos de concreto quando submetidos a elevadas temperaturas, como no caso de um incêndio (Figura 1).

Figura 1 - *Spalling* na estrutura de concreto.



Fonte: Lima *et al.*, (2004).

O fenômeno de *spalling* nos concretos pode ser resultante de dois principais efeitos distintos que ocorrem ao mesmo tempo no interior da matriz do concreto quando aquecida. O primeiro dele está associado ao surgimento de tensões geradas pelas variações térmicas que ocorrem na estrutura e pode ser designado como efeito termomecânico. Já o segundo relaciona-se com a transferência de massa em forma de água, vapor ou ar através dos poros presentes na matriz, causando variação de pressão no interior da estrutura, esse efeito pode ser denominado de natureza termo-hidráulica (KALIFA, MENNETEAU e QUENARD, 2000).

Existem diversos fatores internos e externos que podem implicar na manifestação do fenômeno do *spalling* em concretos. Dentre os fatores internos, destaca-se não só o uso da relação água/cimento muito baixa, mas também adições de materiais com granulometrias finas ou ultra-finas que aumentam a densidade do concreto, reduzindo sua permeabilidade e conseqüentemente, aumentando o risco de ocorrência do fenômeno. Em relação aos fatores externos, aqueles ligados ao

ambiente ao qual a estrutura de concreto está inserida, vale ressaltar que a taxa de aquecimento, temperatura máxima alcançada e tempo de exposição ao fogo são parâmetros cruciais que regem a intensidade do fenômeno (NINCE, 2006).

Para o fenômeno de *spalling*, a estrutura de poros presente na estrutura tem influência direta na sua manifestação. Concretos estruturais de resistência moderada, com matrizes menos densas, permitem a liberação do vapor gerado com maior facilidade devido sua estrutura mais ampla de poros, com maiores diâmetros. Todavia, concretos com resistência elevada possuem uma matriz mais densa, com estrutura de poros reduzida e com menores diâmetros (LIMA *et al.*, 2004).

Concretos de alta resistência (resistência característica de pelo menos 40 MPa) são mais suscetíveis a ocorrência de *spalling* em situações de aquecimento rápido, como é o caso de um incêndio. Devido a sua baixa permeabilidade, o concreto de alta resistência causa limitação na capacidade de liberação do vapor gerado pelos poros, causando um acúmulo de pressão nos poros internos da pasta que cresce na medida em que o aquecimento se intensifica chegando ao momento em que as tensões internas geradas ultrapassam a capacidade resistente, causando uma fragmentação repentina e que pode ser de caráter explosivo (PHAN E CARINO, 2000).

A severidade do fenômeno de *spalling* está diretamente ligada a uma série de fatores que variam de acordo com a situação do incêndio, podendo não trazer sérios danos à estrutura no caso de pequenos deslocamentos superficiais. Entretanto, há situações em que este deslocamento gera grandes perdas de massa, colocando em risco a capacidade estrutural do elemento e podendo levar a estrutura ao colapso (KIRCHHOFF, 2010).

2.4 Propriedades mecânicas de concretos com fibras de polipropileno submetidos a diferentes temperaturas

O polipropileno caracteriza-se como um plástico de baixo custo, o que justifica sua produção em larga escala. Apresenta elevada resistência frente à umidade e a produtos químicos, além disso, possui propriedades mecânicas atraentes. Diante deste ponto de vista o polipropileno torna-se um excelente aliado ao ramo industrial, tanto para fabricação de embalagens, materiais ou produtos. As fibras fabricadas a

partir do polipropileno podem desencadear diferentes propriedades mecânicas devido a variações estruturais, todavia propriedades típicas deste material incluem densidade de ordem $0,90 \text{ g/cm}^3$, resistência a tração entre 550 e 690 MPa, módulo de elasticidade de 3400 GPa e alongamento de 15% (BERNARDI, 2003).

Quando alcançam determinadas temperaturas, em média de 150°C , as fibras de baixa resistência térmica como a de polipropileno fundem deixando espaços vazios na estrutura, tornando o concreto mais poroso e permitindo uma maior migração de gases para o exterior. Este aumento na liberação de gases presentes no interior da estrutura gera um alívio de tensões na mesma, minimizando ou evitando perda de massa por lascamentos do concreto (*spalling*) (BERNARDI, 2003).

Existem opiniões diversificadas em relação a qual dosagem de fibras incorporadas na matriz apresenta melhores resultados frente à ação do fogo, entretanto a dosagem mínima recomendada atualmente indica uma porcentagem maior ou igual a 0,2 %, equivalente a $1,82\text{kg/m}^3$. Evidentemente a determinação do teor de fibras a ser incorporado dependerá das características do concreto, sendo que concretos mais densos necessitam um teor maior, visto que possui uma porosidade reduzida (SARZALEJO *et al.*, 2008).

As fibras quando adequadamente incorporadas na matriz do concreto reduzem a fissuração dos mesmos, garantindo maior capacidade resistente aos concretos quando tracionados, revertendo o comportamento frágil característico do concreto para não frágil. O fato está associado à formação de pontes de transferência de tensão entre as fissuras devido ao acréscimo das fibras, gerando uma distribuição de tensões mais homogênea, evitando assim o acúmulo de tensões nas extremidades das mesmas e conseqüentemente atenuando a velocidade de propagação destas fissuras (FIGUEIREDO, 2005).

De acordo com Félix (2002) as fibras de polipropileno apresentam as melhores propriedades mecânicas quanto à resistência a tração e ao módulo de elasticidade quando comparado a outros plásticos da família dos polímeros.

Nince, Figueiredo e Bittencourt (2003) avaliaram a absorção e índice de vazios de concretos com adição de fibras de polipropileno expostos a temperaturas de 400°C e 600°C . Para fabricação do concreto utilizou-se cimento CP V e as fibras de polipropileno foram adicionadas a uma taxa de 0,3% em relação ao volume total

de concreto, exceto ao traço referência (sem fibras). Os corpos de prova foram moldados e tiveram curas submersas diferenciadas para aquecimento a 400°C e 600°C, sendo estas 14 e 21 dias, respectivamente. A taxa de aquecimento foi de 10°C/min para 400°C e de 6°C/min para 600°C, sendo que inicialmente os corpos de prova permaneceram expostos a ambas as temperaturas por 1 hora. Posteriormente, para a verificação da influência do tempo, novos corpos de prova foram submetidos sob as mesmas condições de temperatura a 400°C, por 5 horas. Os autores constataram que a absorção e o índice de vazios aumentaram não só com o aumento de temperatura, mas também com o tempo de exposição. O tempo de exposição de 1 hora, segundo os autores, não foi suficiente para as fibras se fundirem no núcleo do concreto, devido ao aquecimento desigual da superfície e do núcleo. Para Nince, Figueiredo e Bittencourt (2003) o aquecimento desigual do concreto, além de interferir nos parâmetros já citados, também gera influência na tensão à compressão residual do concreto. Ao atingirem as camadas mais espessas, os acréscimos de temperatura causam uma maior formação de microfissuras devido ações térmicas mais severas na estrutura. Os autores também concluem que o teor de fibras utilizado foi suficiente para eliminar *spalling* do concreto, uma vez que o fenômeno não foi evidenciado em nenhuma das temperaturas estudadas.

Vieira e Godinho (2016) estudaram o comportamento de concretos estruturais com adição de fibras de polipropileno submetidos a altas temperaturas simulando uma situação de incêndio, onde para produção do concreto foi empregado o cimento CP IV-32. Os corpos de provas foram moldados com e sem incorporação de fibras para fins de comparação, sendo que as fibras foram adicionadas a uma taxa de 0,5% do volume total de concreto. Ao atingir 90 dias de cura (60 dias submersa e 30 dias em ambiente de laboratório) os corpos de prova foram expostos a temperaturas de 100°C, 400°C e 800°C, onde ao atingir a temperatura desejada permaneceram em exposição durante 30 minutos. Após resfriamento natural por 24 horas, os corpos de prova foram ensaiados. Segundo os autores, a resistência à compressão axial e o módulo de elasticidade não obtiveram mudança de comportamento quando comparados aos traços sem e com adição de fibras, sendo irrelevante a sua incorporação na matriz. Vieira e Godinho (2016) concluíram que a incorporação das fibras na matriz do concreto minimizou o fenômeno de lascamento explosivo

(*spalling*) do concreto. Para o traço sem incorporação das fibras, o lascamento foi observado logo à temperatura de 400°C, tornando evidente que a fibra é eficiente em situações de incêndio.

A fim de dar continuidade aos estudos realizados por Vieira e Godinho (2016), Tramontin e Godinho (2018) analisaram algumas propriedades mecânicas de concretos estruturais com adição de fibras de polipropileno expostos a elevadas temperaturas, sendo utilizado cimento CP IV-32 para produção dos concretos. Os concretos com incorporação de fibras tiveram as mesmas adicionadas em sua matriz a uma taxa de 0,5% em relação ao volume total de concreto. Também foram moldados corpos de prova sem incorporação de fibras, para fins de comparação. Ao atingir 90 dias de cura (60 dias submersa e 30 dias em ambiente de laboratório) os corpos de prova foram submetidos a temperaturas de 200°C, 300°C, 500°C, 700°C e 900°C. Após atingirem a temperatura desejada, os concretos foram mantidos em exposição durante 30 minutos. Posteriormente, após o processo de resfriamento natural, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios desejados. Os autores observaram que a incorporação de fibras não apresentou resultados satisfatórios em relação à resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral. Os autores observaram queda destas propriedades nos traços com fibras quando comparado com o traço sem adição de fibras. Tramontin e Godinho (2018) justificam a perda das propriedades mecânicas à redução da trabalhabilidade causada pela incorporação das fibras na matriz, que acabaram prejudicando o adensamento no momento da moldagem dos corpos de prova, formando pontos de fragilidade na estrutura. Os autores identificaram decréscimo da resistência mecânica do concreto na medida em que a temperatura foi elevada, entretanto as perdas foram intensificadas a partir dos 300°C.

Dias (2019) analisou o comportamento de concretos estruturais submetidos a situações de incêndio com incorporação de fibras poliméricas em sua matriz, incluindo a fibra de polipropileno. Para produção dos concretos foi utilizado cimento CP III 40-RS. Com exceção ao concreto referência, nos demais concretos houve adição de fibras a taxa de 2 kg/m³, diferindo-os pelo tipo de fibra polimérica utilizada. Após 28 dias de cura úmida, somado a 7 dias de cura em climatizadora com temperatura e umidade constante, os corpos de prova foram submetidos à temperaturas de 300°C, 500°C e 700°C, sendo que a taxa de aquecimento foi de

10°C/min. Posteriormente, as amostras receberam resfriamento lento em temperatura ambiente por 24h e na sequência foram ensaiados. Dias (2019) concluiu que as fibras poliméricas que possuem pontos de fusão não tão elevados (como a de polipropileno) apresentaram melhores resultados, mitigando ou até mesmo evitando o fenômeno de *spalling* dos concretos. Segundo o autor, devido à fusão das fibras de polipropileno ocorrer logo a temperaturas menores, formam poros que permitem o alívio de pressão no interior da estrutura. O autor afirma que o tipo de fibra polimérica empregada e a temperatura de exposição interferiram significativamente na resistência a compressão axial e na resistência à tração por compressão diametral dos concretos. Ainda, segundo Dias (2019), foi notória a diminuição da trabalhabilidade do concreto devido à incorporação de fibras poliméricas.

Dias *et al.* (2020) trabalharam com concreto submetido a elevadas temperaturas, produzidos com cimento CP II-Z 32. Foram realizados ensaios a fim de determinar a influência não só da adição de fibras de polipropileno na matriz do concreto, mas também de fatores como o tipo de resfriamento empregado, tempo de exposição e resistência característica. O autor concluiu que o módulo de elasticidade é a propriedade que mais decresce com o aumento da temperatura, chegando a uma redução de 92% a 800°C quando comparado com o traço referência à temperatura ambiente. Segundo Dias *et al.* (2020), houve aumento da perda de massa e diminuição da resistência à compressão residual devido ao acréscimo de temperatura e aumento do tempo de exposição. Segundo os autores, estes fatos podem estar relacionados com a evaporação da água livre ou fisicamente ligada, e ao surgimento de fissuras no concreto devido à variação de temperatura, respectivamente. Dias *et al.* (2020) também observaram que os corpos de prova com fibras de polipropileno incorporadas em sua matriz não sofreram lascamento explosivo (*spalling*) até a temperatura de 600°C, entretanto o fenômeno foi evidenciado à temperatura de 800°C. No entanto, segundo o autor, foi notória a diminuição da intensidade do fenômeno conforme o aumento do teor de fibras adicionado à matriz, que para o caso estudado foi de 2,40 kg/m³. O tipo de resfriamento (brusco ou natural), segundo Dias *et al.* (2020), não ocasionou alterações significativas nas propriedades mecânicas estudadas.

Com intuito de analisar a resistência à compressão, perda de massa e módulo de elasticidade de concretos estruturais com diferentes teores de fibras de polipropileno submetido a variadas temperaturas, Braga (2020) realizou seus ensaios e avaliações experimentais. Para produção do concreto foi utilizado cimento CP II-E-32. Foram moldados corpos de prova sem e com incorporação de fibras para fins de comparação de resultados, sendo que estas quando empregadas na matriz foram inseridas nas quantidades de 1 kg/m^3 e 2 kg/m^3 . Após 28 dias de cura em câmara úmida, os corpos de prova foram inseridos em mufla com temperaturas de 300°C , 600°C e 800°C e após atingir o valor estimado permaneceram durante 1 hora em exposição. Os corpos de prova foram retirados da mufla para serem resfriados naturalmente por cerca de 24 horas e aos 29 dias de idade foram submetidos aos ensaios experimentais. Em suas análises, Braga (2020) concluiu que a adição de fibras interferiu significativamente nas propriedades investigadas, reduzindo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade em comparação ao concreto referência (sem adição de fibras) para todas as temperaturas estudadas. Segundo o autor este fato pode estar associado ao aumento de porosidade no concreto. Após o ensaio algumas amostras com fibras foram rompidas, e nessas amostras foi facilmente visualizado o aumento da quantidade de poros gerados após aquecimento, que cresceu com o teor de fibras incorporado. Além disso, Braga (2020) relatou que a trabalhabilidade foi prejudicada devido à incorporação das fibras, sendo necessário o uso de aditivo superplastificante.

A fim de determinar a influência da adição de fibras de polipropileno na resistência a compressão do concreto, Matos, Campos e Dias (2021) realizaram estudo com diferentes teores de fibras incorporadas na matriz do concreto, expostos por 30 e 45 minutos a temperaturas de 300°C , 600°C e 900°C submetidos a diferentes tipos de resfriamento (lento e brusco). Para produção do concreto foi utilizado cimento CP V-ARI. Foram moldados corpos de prova com e sem fibras para fins de comparação, sendo as fibras adicionadas em teores de 0,5%, 0,75% e 1% em relação ao volume total de concreto. Os autores observaram em geral uma melhora na resistência à compressão axial para os concretos com adição de fibras para todas as temperaturas testadas, em comparação com o concreto referência (sem adição de fibras), mesmo que seja notória a diminuição desta propriedade de acordo com o tempo de exposição e acréscimo de temperatura. Segundo Matos,

Campos e Dias (2021), o teor de fibras adicionado ao concreto mostrou-se um parâmetro importante que deve ser levado em consideração, sendo que os teores de 0,5% e 0,75% apresentaram-se mais eficientes. Os autores concluíram que o teor de 1% de fibras prejudicou a trabalhabilidade do concreto, comprometendo o adensamento do mesmo.

No Quadro 1 é apresentado em resumo os trabalhos e resultados alcançados pelos autores abordados neste item (2.4).

Quadro 1 - Revisão de trabalhos científicos com fibras de polipropileno em matrizes cimentícias.

Autor	Matriz	Teor de fibra utilizado	Propriedades avaliadas	Conclusões
Nince, Figueiredo e Bittencourt (2003)	Concreto estrutural CP V-ARI	0,3% do volume total do concreto	Absorção e índice de vazios de concretos com fibras de polipropileno expostos a elevadas temperaturas com diferentes tempos de exposição (400°C e 600°C).	O tempo de exposição ao calor para caracterizar as propriedades residuais de um concreto é importante e afeta nos resultados dos ensaios. Houve aumento da absorção e do índice de vazios com o acréscimo da temperatura e do tempo de exposição e não foi observado <i>spalling</i> do concreto em nenhuma das temperaturas estudadas.
Vieira e Godinho (2016)	Concreto estrutural CP IV-32	0,5% do volume total do concreto	Resistência à compressão axial, perda de massa, módulo de elasticidade, difração de raio X de concretos submetidos a elevadas temperaturas (100°C, 400°C e 800°C).	Em relação à queda da resistência à compressão e do módulo de elasticidade a adição de fibras não se mostrou eficaz conforme acréscimo de temperatura de exposição, porém a adição das fibras evitou o <i>spalling</i> . A perda de massa aumentou conforme a temperatura variou.
Tramontin e Godinho (2018)	Concreto estrutural CP IV-32	0,5% do volume total do concreto	Resistência à compressão axial, perda de massa, módulo de elasticidade e resistência à tração por compressão diametral de concretos expostos a elevadas temperaturas (200°C, 300°C, 500°C, 700°C e 900°C).	A adição de fibras de polipropileno não se mostrou eficaz para as propriedades mecânicas em comparação com o traço referência (sem fibras), apresentando menor resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral logo a temperatura ambiente. A perda de massa e módulo de elasticidade também foram maiores para o traço com adição de fibras e a redução nas propriedades mecânicas teve maior intensidade a partir da temperatura de 300°C
Dias (2019)	Concreto estrutural CP III 40-RS	2 kg/m ³	Resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral, perda de massa e velocidade de propagação da onda ultrassônica de concretos submetidos às temperaturas de 300°C, 500°C e 700°C com adição de fibras poliméricas, incluindo a de polipropileno.	Os estudos apontaram que fibras poliméricas com pontos de fusão menos elevados (com o caso da fibra de polipropileno) apresentaram melhores resultados frente ao <i>spalling</i> . Constatou-se também que até a faixa de 300°C não há grandes alterações nas propriedades mecânicas analisadas e que a adição de fibras poliméricas reduz a trabalhabilidade do concreto. O autor concluiu que o tipo de fibra polimérica empregada e as diferentes temperaturas interferiram significativamente na resistência a compressão e a tração por compressão diametral dos concretos.
Dias <i>et al.</i> (2020)	Concreto estrutural CP II-Z 32	1,20 kg/m ³ 1,80 kg/m ³ 2,40 kg/m ³	Módulo de elasticidade, resistência à compressão residual, perda de massa e influência na velocidade do pulso ultrassônico, bem como a influência das fibras de polipropileno quando adicionadas a concretos submetidos a elevadas temperaturas (200°C, 400°C, 600°C e 800°C) sujeitadas a resfriamento brusco e natural.	O módulo de elasticidade foi uma das propriedades mais afetadas com acréscimo de temperatura, chegando a uma redução de 92% a 800°C. Observou-se diminuição da resistência à compressão residual e aumento da perda de massa conforme se eleva o grau e o tempo de exposição a elevadas temperaturas. Houve prevenção do fenômeno do <i>spalling</i> do concreto até a temperatura de 600°C para todos os corpos de prova com adição de fibras de polipropileno, já para a temperatura de 800°C todos os corpos de prova sofreram <i>spalling</i> , contudo o fenômeno foi menos intenso conforme maior o teor de fibras na matriz, no caso deste estudo 2,40 kg/m ³ .
Braga (2020)	Concreto estrutural CP II-E-32	1 kg/m ³ 2 kg/m ³	Resistência a compressão axial, massa específica e módulo de elasticidade de concretos com diferentes teores de fibras de polipropileno expostos a variadas temperaturas (Ambiente, 300°C, 600°C e 800°C).	Avaliou-se que a resistência à compressão e o módulo de elasticidade reduziram mais significativamente para concretos com maior adição de fibras de polipropileno, tanto em temperatura ambiente quanto após exposição a elevadas temperaturas. A trabalhabilidade foi afetada, necessitando adição de aditivos. A porosidade aumentou conforme o acréscimo de fibras na matriz.
Matos, Campos e Dias (2021)	Concreto estrutural CP V-ARI	0,5% 0,75% 1% (do volume total do concreto)	Resistência à compressão axial de concretos com diferentes teores de fibra de polipropileno submetidos a elevadas temperaturas (300°C, 600°C e 900°C) com diferentes tempos de exposição e métodos de resfriamento.	A adição de fibras de polipropileno agiu de forma satisfatória quando incorporadas na matriz, obtendo médias de resistência superiores quando comparadas ao concreto referência para todas as temperaturas estudadas. Ainda constatou-se que os teores de 0,5% e 0,75% de fibras são os mais recomendados, pois a fibra em excesso compromete o adensamento.

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.5 Propriedades mecânicas de misturas cimentícias com vidro cominuído

O vidro pode melhorar algumas propriedades quando incorporado a matriz dos concretos, o fato está relacionado ao material ser amorfo e conter grande quantidade de silício e cálcio em sua composição, características típicas de material pozolânicos (DYER e DHIR, 2001).

Um problema que pode ser causado pela incorporação do vidro cominuído nos concretos é explicado por Neville (2015) como sendo a reação álcali-sílica, o fenômeno tem origem devido à reação entre os constituintes da sílica ativa presente no agregado (vidro) com os álcalis do cimento, à medida em que os elementos reagem entre si formam um gel álcali-silicato confinado pela pasta de cimento hidratada, que em contato com a água expande, aumentando o seu volume e podendo causar fissuração e/ou outros danos à estrutura. Entretanto essa reação é muito lenta e se manifesta somente após vários anos, podendo ainda ser minimizada pelo uso de cimentos com baixos teores de álcalis.

López, Azevedo e Neto (2005) analisaram a resistência à compressão de concretos estruturais com diferentes teores de vidro cominuído e variadas granulometrias, não só substituindo a areia natural, mas também adicionado sobre a mesma. Para produção dos concretos utilizou-se cimento CP IV-32 nos quais após moldagem dos corpos de prova foram submetidos a uma cura de 7 dias antes da realização dos ensaios. Os ensaios foram divididos em duas etapas, sendo que na primeira realizou-se a determinação da melhor faixa granulométrica (entre 0-0,15 mm, 0,15-0,30 mm ou 0,39-0,60 mm) do vidro substituindo 5% da areia natural. Na segunda etapa foi realizado ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova fabricados com vidro cominuído na melhor faixa granulométrica encontrada na primeira etapa. Além do traço sem substituição (referência), foram testados traços com teores de vidro de 5%, 10%, 15% e 20%, substituindo a areia natural e adicionado sobre a massa da mesma. O autor observou na primeira etapa que a melhor granulometria encontrada para os vidros foi de 0,15-0,30 mm, pois os concretos apresentaram maior resistência à compressão em relação às demais. Além disso, na segunda etapa concluiu que o teor de 20% de substituição da areia natural mostrou melhor desempenho em relação aos demais traços, superando em 57% a resistência à compressão em comparação ao traço sem adição de vidro. Já o

teor de 5% que apresentou melhores resultados quando adicionado sobre a massa de areia, apresentando um acréscimo de 56,5% na resistência à compressão dos concretos, quando confrontado com o traço sem adição.

Em estudos realizados por Righi *et al.* (2011) foram testados concretos estruturais com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural em temperatura ambiente e expostos a temperatura elevada de 600°C. Além do traço sem adição de vidro, foram fabricados traços com vidro cominuído em granulometrias menores que 4,8 mm substituindo parcialmente a areia natural em 5%, 10%, 15%, 20% e 100%. Os concretos foram fabricados com cimento CP IV-32 e submetidos a uma cura submersa por 56 dias. Posteriormente, parte das amostras foram expostas à temperatura de 600°C e na sequencia foram submetidas ao ensaio de resistência à compressão axial. Em temperatura ambiente o traço com 20% de substituição obteve os melhores resultados atingindo resistência semelhante ao traço sem substituição. Entretanto, segundo o autor, o traço com 100% de substituição apresentou resistência superior, contudo teve sua trabalhabilidade afetada. Após exposição à temperatura de 600°C, Righi *et al.* (2012) comprovaram novamente que o traço com 20% destacou-se dentre os demais, visto que apresentou comportamento semelhante ao concreto referência, diminuindo sua resistência gradualmente de acordo com o aumento do tempo de exposição. Com finalidade de comprovar o fato de que o concreto com 100% de vidro não é o mais aconselhável, os autores relatam que todos os corpos de prova sofreram lascamento explosivo (*spalling*) após exposição à temperatura de 600°C logo após os primeiros 30 minutos.

Alvarenga Junior, Simão e Fonseca (2017) realizaram estudo sobre o desempenho de concretos não estruturais com diferentes teores de vidro cominuído substituindo a areia natural. Para produção do concreto foi utilizado cimento CP II-E 32, sendo que após moldagem os corpos de prova foram submetidos a uma cura de 28 dias antes da realização do ensaio de resistência a compressão axial. Cabe salientar que além do traço sem substituição (referência), foram fabricados traços com teores de vidro cominuído substituindo a areia natural na ordem de 10% e 20%, sendo que apenas as partículas de vidro passantes na peneira de 4,75mm foram utilizadas. Concluiu-se que o traço de melhor desempenho neste estudo foi o de

20% de substituição, visto que houve aumento na resistência a compressão de 10,3% quando aferido ao traço referência.

Vian (2018) avaliou algumas propriedades de concretos estruturais com teores de 10%, 20% e 30% de vidro cominuído substituindo a areia natural, sendo que a granulometria foi selecionada a partir dos grãos retidos no conjunto de peneiras entre 4,75mm e 0,15mm. Para fabricação do concreto utilizou-se cimento CP V-ARI. Após a produção, os concretos foram submetidos a uma cura de até 28 dias, idade na qual foram realizados os ensaios finais de resistência à compressão axial do concreto, resistência à tração por compressão diametral, absorção, dentre outros. De forma geral, o autor observou que o traço de melhor desempenho foi com 30% de vidro, não apresentando perda de resistência à compressão quando comparado com o traço referência (sem adição de vidro), tornando assim seu uso viável.

Correia *et al.* (2018) estudaram a consistência e desempenho mecânico de concretos não estruturais com substituição parcial da areia natural por diferentes teores de vidro cominuído. Os concretos foram produzidos com cimento CP II-Z 32, sendo que além do traço sem substituição, para fins de comparação, foram moldados corpos de prova com teores de 25%, 50%, 75% e 100% de vidro substituindo a areia. A granulometria do vidro foi selecionada a partir dos grãos retidos entre o conjunto de peneiras 4,75mm e 0,15mm. Após 28 dias de cura foram realizados ensaios de resistência à compressão axial para cada um dos traços. O traço com 75% de substituição apresentou melhores resultados com um ganho de 21,42% na resistência à compressão quando relacionado ao traço sem substituição. Os autores citam que o fato está relacionado ao módulo de finura do agregado miúdo e ao proporcionamento dos agregados influenciarem diretamente nas propriedades do concreto, sendo o teor de 75% considerado ótimo para referida dosagem. Mesmo apresentando elevada resistência à compressão, a trabalhabilidade do concreto com teor de 75% foi muito afetada devido seu elevado módulo de finura, sendo necessário uso de aditivos superplastificantes para aumentar sua fluidez. Entretanto, mesmo que os concretos com 25% e 50% de substituição tenham apresentado resistência inferior ao concreto sem substituição, apresentaram uma maior fluidez, podendo ser empregados em elementos que não exijam grandes solicitações. Correia, Fraga e Ribeiro (2018) observaram que o

concreto com 100% de vidro cominuído apresentou resistência semelhante ao sem substituição, contudo também apresentou baixa fluidez tornando necessário o uso de aditivos superplastificantes.

Liotto (2019) realizou seus estudos com a finalidade de analisar as propriedades de resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral de concretos estruturais com diferentes teores de vidro cominuído substituindo parcialmente a areia natural. Foi utilizado cimento CP IV-32 para fabricação dos concretos, sendo que além do traço referência (sem vidro) foram moldados corpos de prova com 20%, 30%, 40% e 50% de vidro cominuído substituindo a areia com granulometria selecionada a partir das partículas retidas entre o conjunto de peneiras 4,75mm e 0,15mm. Após a confecção e desmoldagem dos concretos, os mesmos foram submetidos a diferentes períodos de cura (7, 14, 21, 28 e 90 dias) para melhor averiguação do comportamento mecânico. Liotto (2019) observou que houve ganho de resistência mecânica (tanto a resistência à compressão axial quanto à tração por compressão diametral) com o aumento de teor de vidro incorporado nas misturas e com a variação da idade de realização dos ensaios, uma vez que aos 90 dias o ganho foi mais acentuado. Dessa forma, segundo o autor, o traço que apresentou maior ganho de resistência foi o com teor de substituição de 50% de vidro substituindo por areia natural.

A fim de avaliar comportamentos de concretos não estruturais, produzidos com cimento CP V e com diferentes teores de vidro cominuído substituindo parcialmente a areia natural, Braga e Ramos (2019) realizam suas pesquisas. Foram moldados corpos de prova com traços contendo teores de 0% (referência), 20%, 50% e 100% de vidro cominuído. A granulometria selecionada para o vidro cominuído foi à de grãos passantes na peneira de abertura 2,5mm. Após 7 dias de cura (6 dias submersa e 1 dia em ambiente de laboratório) cada grupo de corpos de prova foi aquecido a temperaturas de 300°C e 600°C, onde permaneceram expostos pelo tempo de 30 e 60 minutos. Na sequência, os corpos de prova foram resfriados e encaminhados ao ensaio de resistência à compressão axial. Em temperatura ambiente os autores constataram que o traço com 20% de vidro mostrou os melhores resultados, apresentando resistência à compressão equivalente ao traço referência. Braga e Ramos (2019) também informaram que houve decréscimo gradual de resistência à compressão dos concretos de acordo com o aumento do

tempo de exposição, para cada uma das distintas temperaturas. Todavia, o traço com 20% de vidro novamente mostrou-se mais eficaz, apresentando um comportamento superior ao traço referência. Os autores ainda relatam que alguns corpos de prova com 50% e 100% de vidro sofreram *spalling* de acordo com o tempo de exposição a temperaturas de 600°C. Para o traço com 50% de vidro, o fenômeno foi observado durante o tempo de exposição de 60 minutos, já para o traço com 100% de vidro o lascamento já esteve presente nos primeiros 30 minutos de exposição. Segundo os autores, este fato que pode estar relacionado à porosidade reduzida da matriz devido ao excesso de finos.

Com intuito de determinar o comportamento de argamassas com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural, Trentin *et al.* (2020) analisou algumas propriedades que englobam resistência à compressão axial e à tração por compressão diametral, bem como absorção de água por capilaridade. Para a produção das argamassas utilizaram cimento CP IV-32 com teores de 10%, 15%, 25% e 50% de vidro cominuído substituindo parcialmente a areia natural. A granulometria do vidro selecionada para o estudo foi de grãos passantes na peneira 2,36mm e retidos na peneira 0,15mm. Além disso, foi produzido um traço com 0% de vidro para servir como referência. Foram realizados ensaios após 7, 28, 63 e 91 dias de cura dos corpos de prova em câmara climatizada com temperatura e umidade constante. Os resultados mostraram que a resistência à compressão das amostras aumentou até a idade de 63 dias e apresentaram uma leve diminuição aos 91 dias, indicando uma estabilização da resistência à compressão. Segundo Trentin *et al.* (2020), entre as misturas estudadas, o teor de vidro que apresentou maior eficiência tanto a resistência à compressão quanto à tração foi com 50% de substituição, indicando um acréscimo de resistência, quando associado ao traço referência, de 27,38% e 40,4%, respectivamente. Quanto à absorção de água por capilaridade, os autores concluíram que o traço mais adequado foi com o teor de 15% de vidro, pois apresentou uma menor absorção entre os traços.

Costa, Almeida e Moreira (2020) avaliaram o desempenho mecânico quanto à resistência a compressão axial, para a idade de 28 dias, de concretos não estruturais e argamassas com diferentes teores de vidro cominuído substituindo a areia natural. Para fabricação tanto das argamassas como dos concretos foi utilizado cimento CP II-E 32 e além de um traço referência sem substituição, foram moldados

corpos de prova com teores de 10%, 20% e 30% de vidro, o qual não teve granulometria informada. Segundo os autores, para ambos os materiais estudados o traço com 20% de vidro desempenhou melhores resultados, superando a resistência à compressão do traço sem substituição em 45,53% para o concreto e de 6% para a argamassa.

Pereira (2022) estudou concretos estruturais com substituição de 20% da areia natural por vidro cominuído submetidos a diferentes tipos de cura (cura seca em ambiente de laboratório e cura submersa), seu estudo teve a finalidade de analisar não só a resistência à compressão axial, mas também o fenômeno de autocicatrização de concretos. Os concretos foram produzidos com cimento CP V-ARI e além de uma amostra referência (sem substituição), foram moldadas amostras com 20% de vidro cominuído. As granulometrias selecionadas para o vidro foram dos grãos passantes na peneira de 2,36mm e retidos na peneira de 0,15mm. Aos 7 dias de idade, aplicou-se um carregamento de compressão em parte das amostras de 75% da sua capacidade resistente, esta etapa teve a finalidade de causar dano interno nas matrizes cimentícias para após avaliar se houve autocicatrização. Com 28 dias de idade foram realizados os ensaios de resistência à compressão que permitiram observar uma redução de resistência em relação ao traço referência devido à substituição da areia por 20% de vidro e que o tipo de cura empregado teve impacto, sendo que a cura a seco mostrou melhores resultados em relação à cura submersa. Por fim, a autora constatou que o pré-carregamento aplicado não afetou significativamente as propriedades mecânicas do concreto, podendo ter havido a autocicatrização.

No Quadro 2 é apresentado em resumo os trabalhos e resultados alcançados pelos autores abordados neste item (2.5).

Quadro 2 - Revisão de trabalhos científicos com vidro cominuído em matrizes cimentícias.

Autor	Matriz	% vidro utilizado	Propriedades avaliadas	Conclusões
López, Azevedo e Neto (2005)	Concreto estrutural CP IV-32	5% 10% 15% 20%	Resistência à compressão axial de concretos com diferentes granulometrias e diferentes teores de vidro não só substituindo, mas também adicionado sobre a areia natural.	A granulometria de 150-300 µm foi a que apresentou os melhores resultados. O traço com 20% de vidro substituindo a areia mostrou o melhor desempenho de resistência, superando em 57% o traço referência. Já para o teor em massa adicionado sobre a areia, o melhor teor foi o de 5% com um aumento de 56,6% da resistência à compressão axial em relação ao traço de referência (sem substituição).
Righi <i>et al.</i> (2011)	Concreto estrutural CP IV-32	5% 10% 15% 20% 100%	Resistência à compressão axial de concretos com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural à temperatura ambiente e em elevada temperatura (600°C).	Foi observado que o traço com 20% de vidro apresentou melhores resultados em temperatura ambiente. O concreto com 100% de substituição apresentou resistência superior, porém a trabalhabilidade foi prejudicada. Em exposição a altas temperaturas, todos CP'S com substituição de 100% da areia sofreram <i>spalling</i> , inviabilizando o uso em situações de incêndio, já o traço que apresentou resultados similares ao concreto referência, diminuindo gradualmente a resistência conforme tempo de exposição foi novamente traço com 20% de vidro. Todos os traços perderam resistência gradativamente com o tempo de exposição à temperatura de 600°C.
Alvarenga Junior, Simão e Fonseca (2017)	Concreto não estrutural CP II-E 32	10% 20%	Resistência à compressão axial de concretos com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural.	O traço com 20% de vidro foi que apresentou melhores resultados em relação aos traços estudados, sendo que houve um aumento de resistência de 10,3% em relação ao traço referência (sem substituição).
Vian (2018)	Concreto estrutural CP V-ARI	10% 20% 30%	Resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, capilaridade, absorção e índice de vazios de concretos com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural.	De forma geral definiu-se que o traço com 30% de vidro foi quem apresentou melhores resultados para as propriedades analisadas, mesmo que o traço com 10% de vidro também tenha apresentado resistência elevada.
Correia <i>et al.</i> (2018)	Concreto não estrutural CP II-Z 32	25% 50% 75% 100%	Consistência e desempenho mecânico de concretos com substituição parcial da areia natural pelo vidro em diferentes teores.	Quanto ao desempenho mecânico o concreto com teor de 75% de vidro foi que apresentou maior resistência à compressão axial, com um ganho de 21,42% em relação ao traço referência. Em relação à trabalhabilidade, os traços com 100% e 75% de vidro apresentaram-se muito consistentes devido ao elevado módulo de finura, tornando necessária a utilização de aditivos superplastificantes para garantir boa trabalhabilidade, já o traço com 25% de vidro apresentou elevada fluidez e o traço com 50% de substituição apresentou consistência semelhante ao concreto referência.
Liotto (2019)	Concreto estrutural CP IV-32	20% 30% 40% 50%	Resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral de concretos com substituição parcial da areia natural por vidro moído.	Houve ganho de resistência tanto à compressão axial quanto a tração por compressão diametral de acordo com o aumento de teor de vidro incorporado a mistura e a idade dos ensaios, sendo o teor de 50% de vidro substituindo a areia que apresentou melhores resultados com maior ganho de resistência em relação ao traço referência.

continua

continuação

Autor	Matriz	% vidro utilizado	Propriedades avaliadas	Conclusões
Braga e Ramos (2019)	Concreto não estrutural CP V	20% 50% 100%	Resistência à compressão axial de concretos com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural após exposição a elevadas temperaturas.	Constatou-se que a temperatura ambiente o traço com 20% de vidro foi que apresentou melhores resultados, obtendo resistência equivalente ao traço referência. Após exposição às temperaturas de 300°C e 600°C houve diminuição gradual da resistência de acordo com o tempo de exposição, sendo que o traço com 20% de vidro novamente foi que apresentou comportamento superior ao traço referência para ambas as temperaturas estudadas, sendo o mais indicado. Alguns CP'S com 50% e 100% de vidro sofreram <i>spalling</i> de acordo com o tempo de exposição à temperatura de 600°C, fato relacionado ao acúmulo de pressão nos poros pelo aquecimento.
Trentin <i>et al.</i> (2020)	Argamassa CP IV-32	10% 15% 25% 50%	Resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão e absorção de água por capilaridade de argamassas com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural.	Em relação à compressão axial e a resistência à tração na flexão, o traço que apresentou melhores resultados foi o traço com 50% de vidro, apresentando um ganho de resistência de 27,38% e 40,4% respectivamente, em relação ao traço referência. Relativo à absorção de água o traço que melhor apresentou resultados foi o de 15% de vidro, apresentando menor absorção.
Costa, Almeida e Moreira (2020)	Concreto não estrutural Argamassa CP II-E 32	10% 20% 30%	Resistência à compressão axial de concretos e argamassas com diferentes teores de vidro substituindo a areia natural.	Observou-se que o traço com 20% de vidro apresentou melhores resultados, elevando a resistência do concreto em todas as idades ensaiadas, superando a resistência do traço referência 45,53% aos 28 dias e tornando o concreto estrutural devido adição do vidro. Para os traços de argamassas estudados, o teor de 20% também foi o mais adequado, apresentando um ganho de resistência de 6% aos 28 dias em relação ao traço referência.
Pereira (2022)	Concreto estrutural CP V-ARI	20%	Resistência à compressão axial e avaliação da autocicatrização de concretos com vidro cominuído substituindo parte do agregado miúdo submetido a diferentes tipos de cura.	Os resultados mostraram que a incorporação do vidro no teor de 20% substituindo a areia promoveu redução da resistência à compressão axial em relação ao traço referência e que a cura em ambiente de laboratório (á seco) comparada com a cura submersa apresentou melhores resultados. Também foi constatado que o pré-carregamento aplicado não afetou propriedades mecânicas do concreto, portanto pode ter havido autocicatrização.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fim.

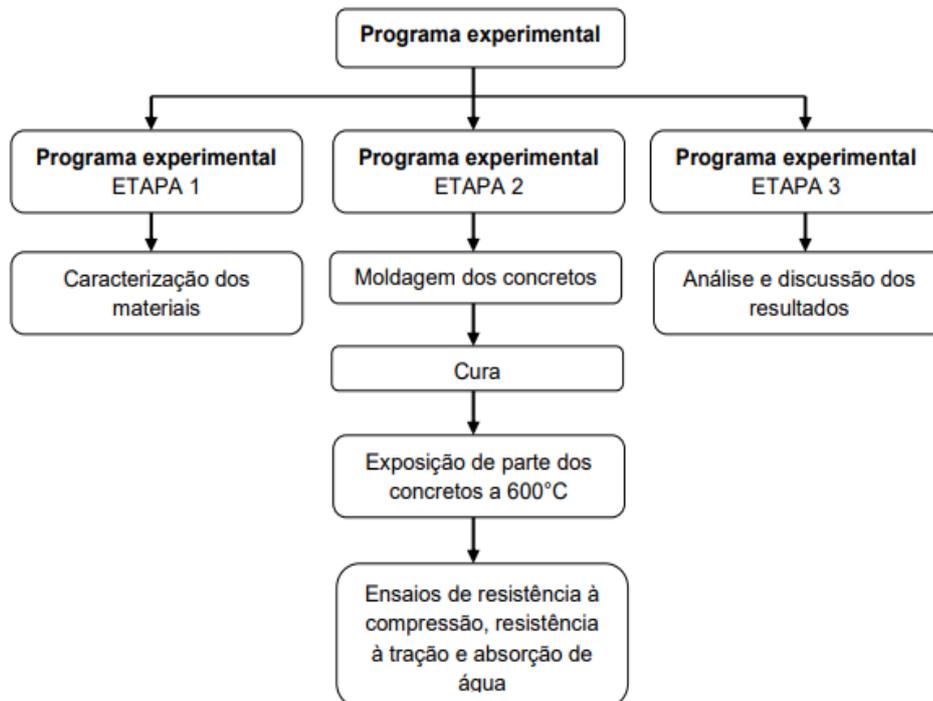
3 METODOLOGIA

Nesta seção (itens 3.1 a 3.3) serão apresentados os materiais e métodos que foram utilizados para que a pesquisa fosse desenvolvida e os objetivos fossem alcançados.

O experimento foi executado no município de Alegrete-RS, onde utilizou-se o Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete/RS para realização dos ensaios.

O programa experimental foi organizado em três etapas distintas, conforme exposto na Figura 2.

Figura 2 - Programa experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 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 dos concretos.

A caracterização do aglomerante, das fibras de polipropileno e do aditivo superplastificante foram obtidas a partir dos respectivos fabricantes. A

caracterização dos agregados (areia natural, areia de vidro e brita) foi realizada no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia civil da Unipampa, campus Alegrete/RS.

O Quadro 3 apresenta em resumo os ensaios que foram executados para a caracterização dos materiais e suas respectivas normas técnicas.

Quadro 3 - Ensaio de caracterização dos materiais

Material	Propriedades	Obtenção	Norma Regulamentadora
Aditivo Superplastificante	Químicas	Fabricante	-
Fibras de polipropileno	Físicas e mecânicas	Fabricante	-
Cimento Portland	Físicas, químicas e mecânicas	Fabricante	-
Agregado Miúdo	Granulometria	Ensaio Laboratoriais	NBR 17054 (ABNT, 2022)
	Massa Específica		NBR 16916 (ABNT, 2021)
	Absorção de água		NBR 16916 (ABNT, 2021)
Agregado Graúdo	Granulometria	Ensaio Laboratoriais	NBR 17054 (ABNT, 2022)
	Massa Específica		NBR 16917 (ABNT, 2021)
	Absorção de água		NBR 16917 (ABNT, 2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Cimento

O cimento adotado para produção dos concretos foi o CP-IV 32RS, recomendado para uso geral. De acordo com fabricante, sua composição é baseada em silicatos e aluminatos de cálcio, sulfato de cálcio, material carbonático e pozolana. A massa específica do cimento Portland utilizado foi determinada de acordo com a NBR 16605 (ABNT, 2017), onde o valor encontrado foi de 2,73 g/cm³. No quadro 4 estão apresentadas as características físicas, mecânicas e químicas do cimento fornecidas pelo fabricante.

Quadro 4 - Caracterização do cimento CP-IV 32RS

EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS								
	Finura			Tempo de pega		Resistência à compressão		
	Blaine (cm ² /g)	#200 (%)	#325 (%)	Íncio (min)	Fim (min)	3 Dias (MPa)	7 Dias (MPa)	28 Dias (MPa)
Exigências	-	<= 8,0	-	>= 60	<= 720	>= 10	>= 20	-
Média	5.597	0,5	1,6	258	302	19,3	22,1	-
Desvio padrão	158	0,2	0,5	29	27	0,8	0,4	-
EXIGÊNCIAS QUÍMICAS								
	MgO (%)	SO3 Média (%)	Perda ao fogo Média (%)		Resíduo insolúvel (%)			
Exigências	-	<= 4,5	<= 6,5		-			
Média	4,6	2,3	4,7		38,5			
Desvio padrão	0,3	0,0	0,3		0,7			

Fonte: Fornecido pelo fabricante.

3.1.2 Agregado Miúdo

Para desenvolvimento da pesquisa foram utilizados distintos materiais como agregado miúdo, sendo eles a areia natural e o vidro moído.

O vidro utilizado para produção dos corpos de prova teve origem de garrafas do tipo *long neck* de coloração âmbar, o qual já se encontrava moído no laboratório de materiais do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pampa conforme a Figura 3. A moagem foi realizada em outra ocasião em moinho de bolas para realização de pesquisa com vidro moído, sendo a quantidade excedente armazenada para ser utilizado em futuras pesquisas. A granulometria utilizada foi selecionada através dos grãos passantes na peneira de 4,75 mm e retidos na peneira de 0,15mm, tendo sua dimensão máxima definida como 4,75 mm e módulo de finura de 4,03. As massas específicas e absorção de água do vidro foram determinadas conforme NBR 16916 (ABNT, 2021), sendo os resultados obtidos expressos na Tabela 1. A composição granulométrica do vidro também foi determinada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022) e a curva obtida está apresentada na Figura 4.

Tabela 1 - Caracterização física do agregado miúdo – Vidro moído

Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,27
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,30
Absorção de água (%)	1,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 - Vidro moído utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A areia natural utilizada para produção do concreto é proveniente do município de Alegrete-RS, tendo sua dimensão máxima definida como 0,60 mm e módulo de finura de 1,43. As massas específicas e absorção de água da areia natural foram determinadas de acordo com a NBR 16916 (ABNT, 2021), sendo os resultados obtidos expressos na Tabela 2. A composição granulométrica da areia natural também foi determinada de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022) e a curva obtida está apresentada na Figura 4.

Tabela 2 - Caracterização física do agregado miúdo – Areia natural

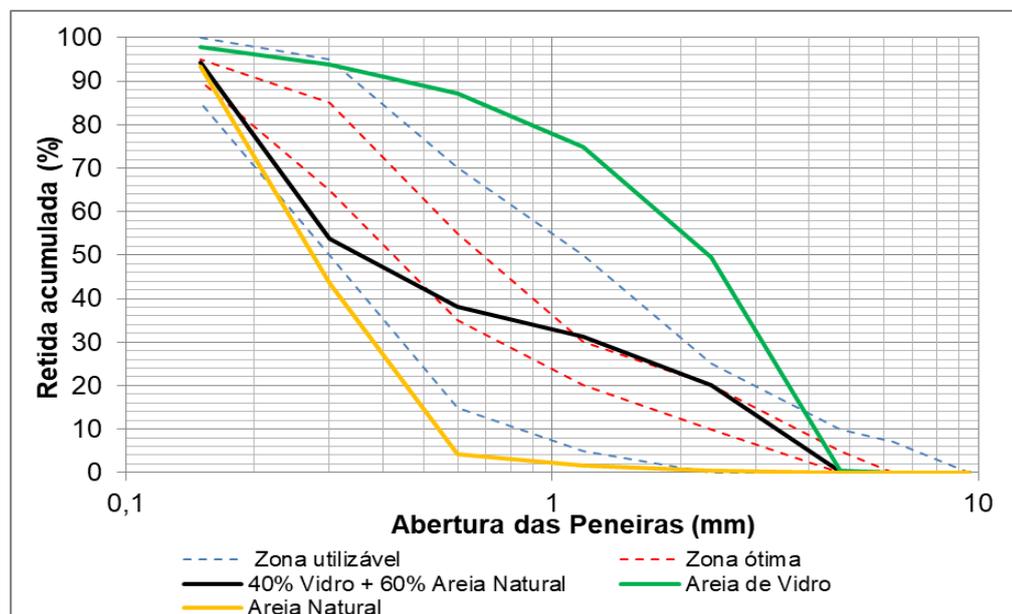
Massa específica do agregado seco (g/cm ³)	2,54
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	2,55
Absorção de água (%)	0,34

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de determinar a curva granulométrica da mistura a ser empregada como agregado miúdo para produção dos concretos foi realizada a análise da distribuição granulométrica da composição composta por 40% vidro moído e 60% areia natural

de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), sendo os resultados obtidos expressos na Figura 4.

Figura 4 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos e da mistura



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os agregados miúdos provenientes da areia natural e do vidro moído ficaram abaixo do limite normativo inferior e acima do limite normativo superior indicado para o agregado miúdo, respectivamente. Apesar dessa limitação, pode-se perceber que a curva granulométrica para a composição 40% vidro e 60% areia enquadrou-se na zona utilizável prevista para o agregado miúdo, sendo mais adequada para a utilização na produção dos concretos. Contudo, mesmo não tendo se enquadrado nos limites previstos em norma, foi utilizado a areia natural para produção dos traços que não receberam vidro em sua composição, devido a dificuldade de adquirir uma areia com granulometria que se enquadre na zona utilizável ou ótima na região de Alegrete-RS.

3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto é oriundo do município de Alegrete/RS, sendo classificado como brita 1 com diâmetro máximo de 19 mm e módulo de finura de 6,95. Na Figura 5 está apresentada a sua composição granulométrica conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022), onde se observa que o

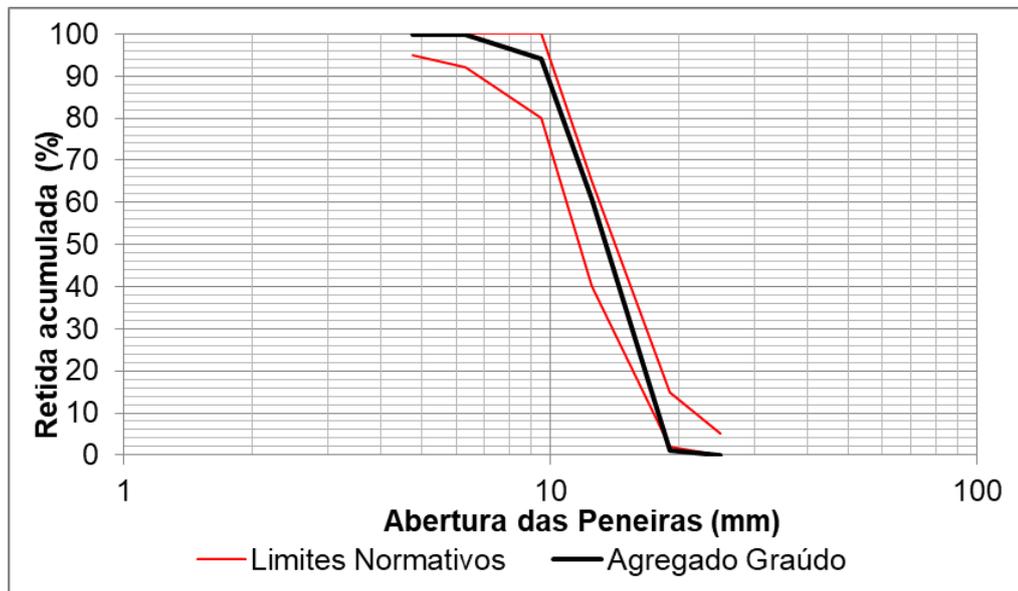
agregado está dentro da zona utilizável, atendendo os parâmetros para seu emprego em concretos. Também foram determinadas as massas específicas e absorção de água do agregado conforme a NBR 16917 (ABNT, 2021), sendo os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização física do agregado graúdo

Massa específica do agregado seco (g/cm^3)	2,72
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3)	2,78
Absorção de água (%)	2,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5 - Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.4 Aditivo Superplastificante

De acordo com o fabricante, o aditivo empregado trata-se de um aditivo orgânico à base de polycarboxilatos de última geração, proporcionando elevado poder de dispersão, elevada trabalhabilidade, redução de água e ganho de resistência mecânica ao concreto. Sua massa específica varia de $1,05 - 1,07 \text{ g}/\text{cm}^3$ e a dosagem recomendada é de 0,2 a 2,0 % sobre o peso do cimento.

3.1.5 Fibras de Polipropileno

De acordo com fabricante, as fibras de polipropileno utilizadas são produzidas a partir da resina básica de olefina modificada, dentre as suas principais características destacam-se a durabilidade em longo prazo (livre da corrosão), dano ao fogo reduzido (*anti-spalling*), menor custo e mais seguro e leve quando comparadas as fibras de aço. A dosagem recomendada varia de 4 a 6 kg por metro cúbico de acordo com fabricante. Algumas das principais características das fibras utilizadas estão dispostas na Tabela 4. A Figura 6 apresenta uma amostra das fibras de polipropileno empregada nos concretos.

Tabela 4 - Caracterização das fibras de polipropileno

Comprimento (mm)	54
Ponto de fusão (°)	159-179
Resistência à tração (MPa)	640
Ponto de ignição (°)	>450

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 - Fibras de polipropileno



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.6 Água

A água utilizada na fabricação dos concretos e nos processos de cura por submersão foi proveniente da rede pública de abastecimento de água de Alegrete-RS.

3.2 Etapa 2 - Produção e Cura dos Concretos

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, preliminarmente ao desenvolvimento da pesquisa. A partir do traço padrão foram realizadas alterações, como a incorporação de vidro cominuído e fibras de polipropileno.

O desenvolvimento do Programa Experimental foi realizado com a execução de quatro traços (Tabela 5), com consumo de cimento de 408 kg/m³ para o traço referência. Um dos traços (T1-REF) chamou-se de traço referência por ser composto por 100% de agregado miúdo natural (areia) e por não conter fibras de polipropileno na matriz. O traço 2 (T2-F) foi produzido com a incorporação de fibras de polipropileno a uma taxa de 5 kg de por metro cúbico (recomendado pelo fabricante) e 100% de agregado miúdo natural (areia). O traço 3 (T3-V) foi produzido com substituição parcial em massa de 40% do agregado miúdo por vidro cominuído e o traço 4 (T4-FV) além da substituição parcial em massa de 40% do agregado miúdo por vidro cominuído, adicionou-se fibras de polipropileno a uma taxa de 5 kg por metro cúbico (recomendado pelo fabricante). A porcentagem de 40% de substituição de areia natural por areis de vidro foi adotada por ser um valor intermediário entre os teores que vem sendo estudados no meio acadêmico. Autores como Braga e Ramos (2019) mencionam que houve *spalling* de corpos de prova com 50% de vidro cominuído (sem fibras) quando exposto a temperaturas de 600°C. Em Trabalhos realizados por Righi *et al.* (2011) e Braga e Ramos (2019) com o teor de 20% de substituição do agregado miúdo por vidro cominuído, não foi evidenciado *spalling* a 600°C. Como um dos objetivos da pesquisa é o de avaliar o efeito das fibras de polipropileno na minimização do *spalling* de concretos expostos a elevada temperatura (600°C), foi definido o teor de 40% para a substituição do agregado miúdo.

Tabela 5 - Traços unitários em massa

Traço	Cimento	Areia natural	Areia de vidro	Brita	Uso de fibra	Taxa de superplastificante	a/c
T1-REF	1	1,64	0	2,86	Não	0,13%	0,42
T2-F	1	1,64	0	2,86	Sim	0,13%	0,42
T3-V	1	0,98	0,66	2,86	Não	0,23%	0,42
T4-FV	1	0,98	0,66	2,86	Sim	0,23%	0,42

T1-REF - Traço referência (convencional)

T2-F - Traço com fibras

T3-V - Traço com vidro

T4-FV - Traço com fibras e vidro

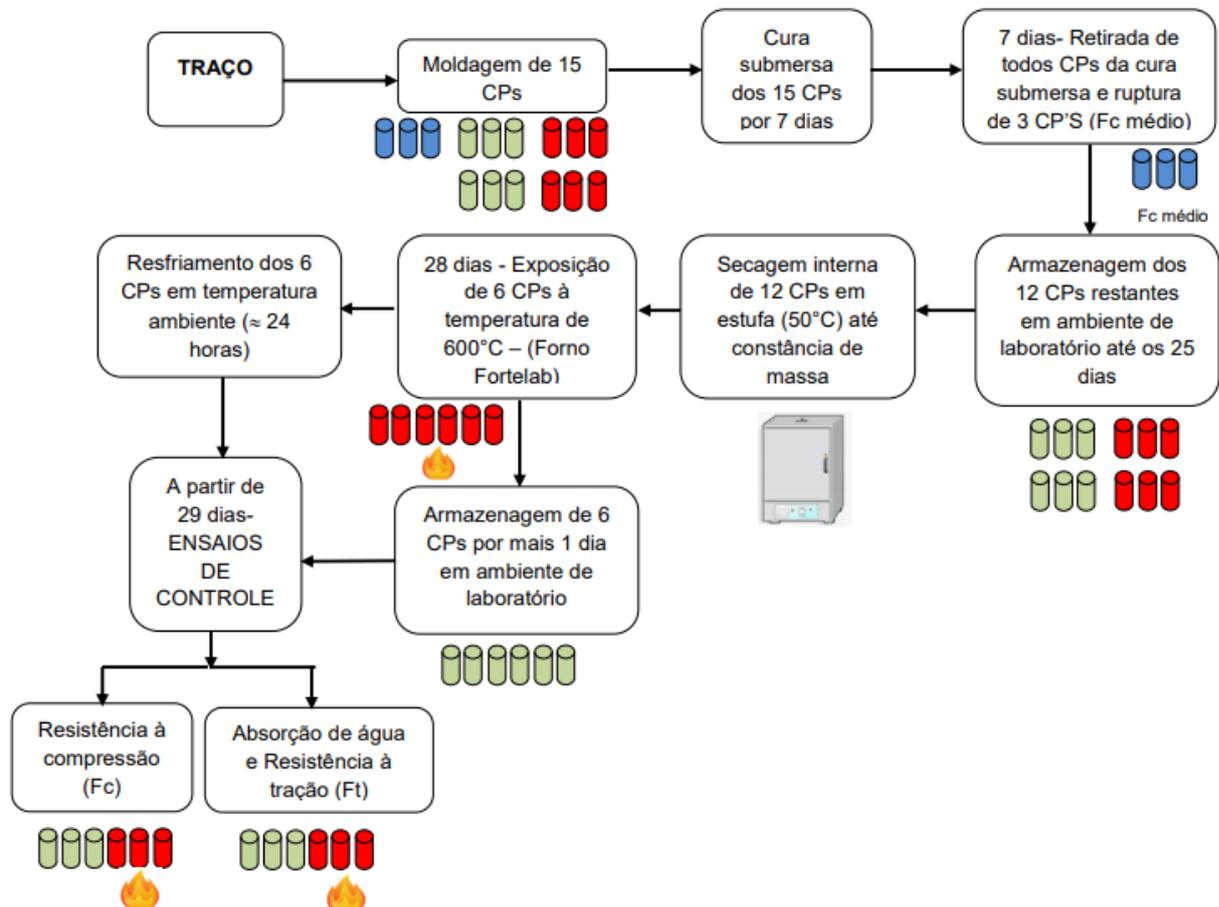
Fonte: Elaborado pelo autor.

A trabalhabilidade dos concretos ($8\pm 2\text{cm}$) foi monitorada pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, de acordo com a norma NM 67 (ABNT, 1998). Para o ajuste da trabalhabilidade dos concretos sem afetar altamente sua resistência, utilizou-se aditivo superplastificante nas taxas já indicadas na tabela 5.

Após a produção dos concretos, os corpos de prova foram moldados conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015) e a propriedade de massa específica no estado fresco determinada para cada traço produzido, conforme ensaio descrito na NBR 9833 (ABNT, 2008), tendo como resultados $2419,16 \text{ kg/m}^3$ para o traço T1-REF, $2425,52 \text{ kg/m}^3$ para o traço T2-F, $2489,18 \text{ kg/m}^3$ para o traço T3-V e $2492,37 \text{ kg/m}^3$ para o traço T4-FV.

Na Figura 7 está apresentado o detalhamento dos processos realizados na Etapa 2 do Programa Experimental por traço produzido.

Figura 7 - Detalhamento da Etapa 2 do Programa Experimental por traço

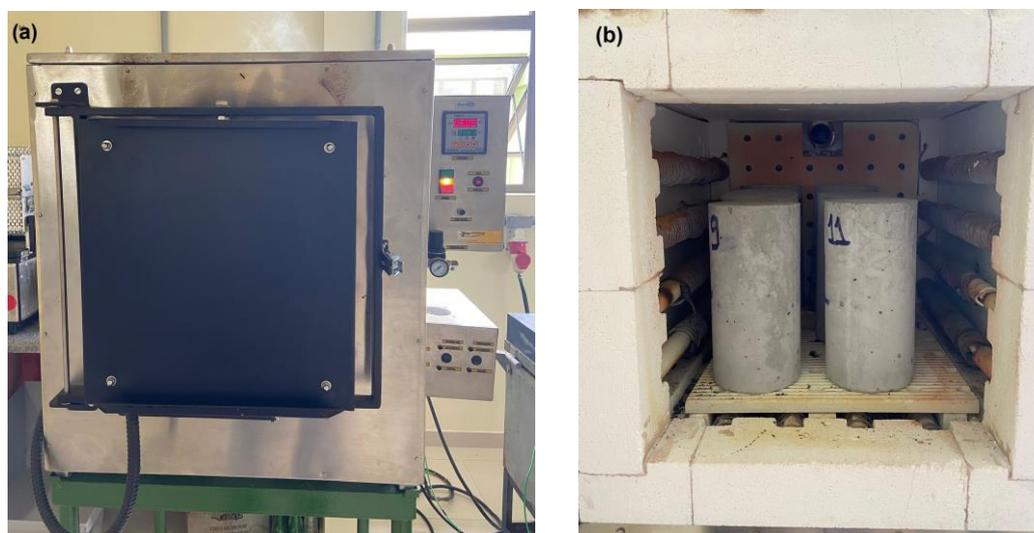


Fonte: Elaborado pelo autor.

Um dia após a moldagem, os concretos foram retirados dos moldes metálicos e acondicionados em cura submersa. Aos 7 dias de idade, todas as amostras foram retiradas da cura submersa. Nesta idade, 3 corpos de prova foram rompidos para determinação da resistência à compressão axial para o controle de resistência. As demais 12 amostras foram reservadas em ambiente de laboratório até o processo de secagem em estufa com a finalidade de homogeneização da umidade interna. A retirada do excesso de umidade foi realizada mantendo as amostras em estufa a temperatura de 50°C, até atingirem constância de massa. Após este procedimento, as amostras permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de 25 dias. Aos 28 dias, 6 amostras foram expostas ao aquecimento a temperatura de 600°C em um forno elétrico da marca Fortelab, com capacidade de 40 litros, potência de 14000W e temperatura de alcance de 1300°C (Figura 8). As outras 6 amostras restantes permaneceram em ambiente de laboratório até a idade de realização dos ensaios de

controle e serviram como amostras de referência. O aquecimento do forno foi de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ para cada corpo de prova, valor que se encontra em conformidade com as recomendações da RILEM TC129 MHT (2000), que leva em consideração o diâmetro dos corpos de prova a serem aquecidos. Como se inseriu 6 corpos de prova no forno elétrico, foi utilizada uma taxa de aquecimento de $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Ao atingir 600°C , os corpos de prova ficaram expostos à esta temperatura durante 30 minutos. De acordo com Lima (2005), é nesse período que ocorrem os principais deslocamentos do concreto. Também segundo o autor, 30 minutos seria o tempo mínimo que se esperaria que uma estrutura resistisse ao incêndio. Alcançado o tempo pré-determinado de exposição, o forno foi desligado e os corpos de prova foram resfriados naturalmente em seu interior, de porta fechada, por aproximadamente 24 horas. A partir dos 29 dias de idade, as propriedades mecânicas dos concretos (f_c e f_t) e de indicativo de durabilidade (absorção) foram determinadas por meio dos ensaios de controle.

Figura 8 - Processo de aquecimento dos corpos de prova, onde: (a) Forno elétrico Fortelab utilizado; (b) Amostras expostas para aquecimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o fluxograma da Figura 7 ser aplicado os 4 traços do programa experimental, os dados foram compilados e analisados.

3.3 Etapa 3 - Ensaio de Controle

Os ensaios de controle para avaliação das propriedades mecânicas e de indicativo de durabilidade foram iniciados a partir dos 29 dias de idade dos concretos.

3.3.1 Absorção de água por capilaridade

O ensaio para determinação da absorção de água por capilaridade seguiu as prescrições da NBR 9779 (ABNT, 2012), sendo realizado após o processo de exposição a 600°C e resfriamento natural dos corpos de prova. Após a exposição dos concretos a água, as leituras de suas massas em função do tempo foram determinadas em 3, 6, 24, 48 e 72 horas, após o início do ensaio.

3.3.2 Resistência à compressão axial

A resistência mecânica à compressão axial dos concretos foi avaliada pela NBR 5739 (ABNT, 2018), não só aos 7 dias de idade, mas também após os concretos terem atingido a idade de 29 dias, onde o ensaio foi realizado anteriormente e posteriormente à exposição a 600°C e resfriamento natural de parte dos corpos de prova. Para este ensaio, utilizou-se uma prensa modelo PC 150C, marca EMIC, com capacidade máxima de 1500kN, sendo o carregamento aplicado com uma velocidade de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s (Figura 9 – a).

3.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral em corpos cilíndricos seguiu as prescrições da NBR 7222 (ABNT, 2011) e foi realizado após a idade de 29 dias, anteriormente e posteriormente à exposição a 600°C e resfriamento natural de parte dos corpos de prova. Para este ensaio, utilizou-se uma prensa modelo PC 150C, marca EMIC, com capacidade máxima de 1500kN, sendo a carga aplicada com uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ MPa/s (Figura 9 – b).

Figura 9 - Prensa EMIC utilizada para realização dos ensaios de resistência: (a) À compressão; (b) À tração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção (itens 4.1 a 4.4) serão mostrados e discutidos os resultados alcançados após a realização dos ensaios utilizados para determinação das propriedades dos concretos produzidos.

O Quadro 4 apresenta a nomenclatura adotada para cada traço, assim como suas correspondentes abreviaturas utilizadas nessa seção.

Quadro 5 - Nomenclatura dos traços adotada

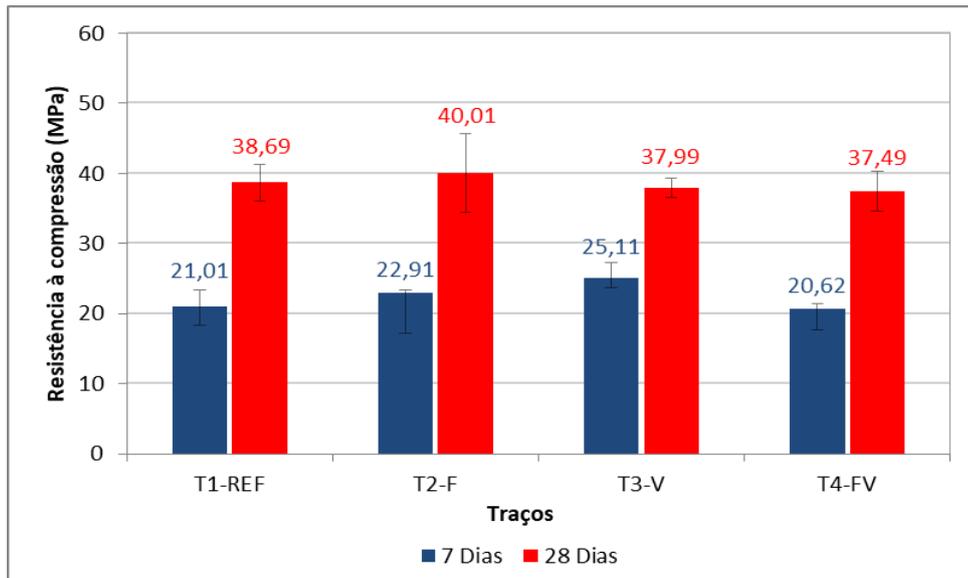
Traço	Abreviatura
Traço referência (convencional)	T1-REF
Traço com fibras	T2-F
Traço com vidro	T3-V
Traço com fibras e vidro	T4-FV

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Resistência à compressão axial

Na idade de 7 dias, realizou-se o rompimento de 3 amostras para cada traço estudado com a finalidade de averiguar a resistência dos concretos antes de atingirem a idade de 28 dias, período onde teoricamente o concreto atinge a maior parte de sua resistência. Aos 28 dias, houve a ruptura final de 3 corpos de prova para cada traço, sendo os resultados médios obtidos nas rupturas expressos na Figura 10.

Figura 10 - Resistência média aos 7 e 28 dias de idade



Fonte: Elaborado pelo autor.

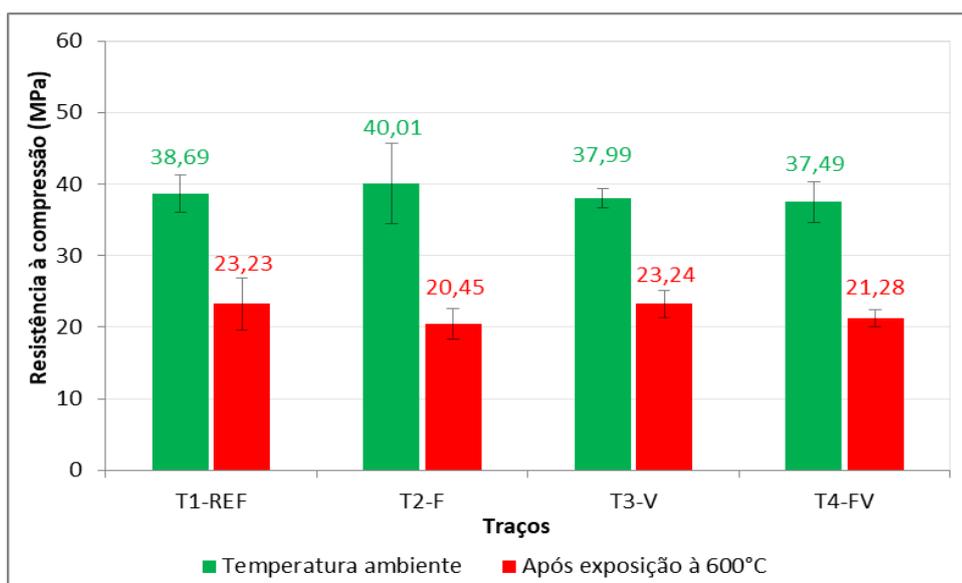
A Figura 10 mostra que para todos os traços investigados houve um crescimento da resistência à compressão axial dos sete para os 28 dias, como o esperado. Todas as misturas produzidas atingiram resistência superior a inicialmente prevista para a mistura de referência (35MPa) aos 28 dias.

Aos 7 dias de idade percebeu-se que o traço T3-V obteve um acréscimo de 19,5% na resistência em relação ao T1-REF, já o traço T2-F mostrou um aumento de 9% quando comparado ao traço T1-REF e o traço T4-FV apresentou um pequeno decréscimo de 1,8% na resistência em relação ao T1-REF. Aos 28 dias de idade, o traço T2-F apresentou um acréscimo de resistência de 3,4% quando confrontado com o T1-REF, enquanto os traços T3-V e T4-FV apresentaram um pequeno decréscimo de 1,8% e 3,1%, respectivamente, quando comparados ao traço T1-REF. A substituição da areia pelo vidro a uma taxa de 40% para fabricação do concreto indica não haver importante perda de resistência à compressão quando comparada ao traço referência, uma vez que a resistência obtida permaneceu equivalente a do traço referência após a substituição. Comportamento semelhante ao destacado por Vian (2018), que utilizou um percentual de 30% de substituição de areia de vidro nas suas pesquisas. Braga e Ramos (2019), também relataram a não ocorrência de perdas na resistência mecânica de concretos produzidos com 20% de vidro cominuído substituindo a areia natural.

Com a finalidade de testar a resistência a compressão axial de cada traço após exposição a uma situação de incêndio, houve aos 28 dias a ruptura de três corpos de prova que foram submetidos ao aquecimento à temperatura de 600°C. Durante o processo de exposição dos concretos à elevada temperatura (600°C) não foi observado o fenômeno do *spalling* (lascamento do concreto) nos traços estudados, o que acabou dificultando a análise da contribuição das fibras de polipropileno para minimizar e/ou conter esse fenômeno.

Os resultados médios de resistência obtidos para os concretos após aquecimento encontram-se dispostos na Figura 11, ao lado dos resultados médios obtidos anteriormente para os mesmos traços sem exposição à temperatura elevada.

Figura 11 - Resistência média aos 28 dias antes e após exposição a 600°C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista os resultados obtidos após exposição à mufla (Figura 11), percebe-se que todos os traços apresentaram perda na resistência à compressão axial. O traço T1-REF perdeu cerca de 40% de sua resistência inicial após a exposição a 600°C, enquanto os traços T2-F, T3-V e T4-FV perderam 48,9%, 38,8% e 43,2%, respectivamente. Comportamento semelhante ao expresso por Righi *et al.* (2011) e Braga e Ramos (2019), onde todos os traços estudados apresentaram perda de resistência mecânica conforme o tempo de exposição a temperatura elevada.

Após a exposição a 600°C o traço T1-REF apresentou resistência semelhante ao traço T3-V. Já os traços T2-F e T4-FV apresentaram um declínio maior na resistência quando confrontados com o traço T1-REF. Um dos fatores que podem ter influenciado em uma queda mais acentuada para os traços T2-F e T4-FV após o aquecimento é a adição de fibras, pois a mesma causa um aumento na porosidade do concreto, afetando assim a sua resistência. Autores como Tramontin e Godinho (2018) e Braga (2020) relataram em suas pesquisas que a adição de fibras de polipropileno nos concretos ocasionou uma queda mais expressiva nas propriedades mecânicas quando confrontados com o traço sem fibras, possivelmente fomentada pelo aumento de vazios gerados após fusão das fibras.

Quando se analisa os traços nas mesmas condições de exposição de temperatura (Figura 11), parece não haver diferença significativa entre os resultados de resistência à compressão axial (f_c). Ou seja, em uma primeira leitura, parece que o teor de areia de vidro e o teor de fibra de polipropileno utilizado não interferiram de forma importante na resistência à compressão axial dos concretos. Em contrapartida, quando são comparados os resultados dos traços expostos à temperatura ambiente com os traços expostos à temperatura de 600°C, observa-se que a exposição dos concretos à mufla promoveu perdas da propriedade mecânica para todos os traços.

Para uma melhor análise dos resultados obtidos foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95%. Os valores de probabilidade abaixo de 0,05 ($p \leq 0,05$), para cada comparação entre as médias, indica haver diferença estatística significativa entre os parâmetros testados. Na Tabela 6 estão dispostos os resultados encontrados.

Tabela 6: ANOVA – Resistência à compressão axial de concretos

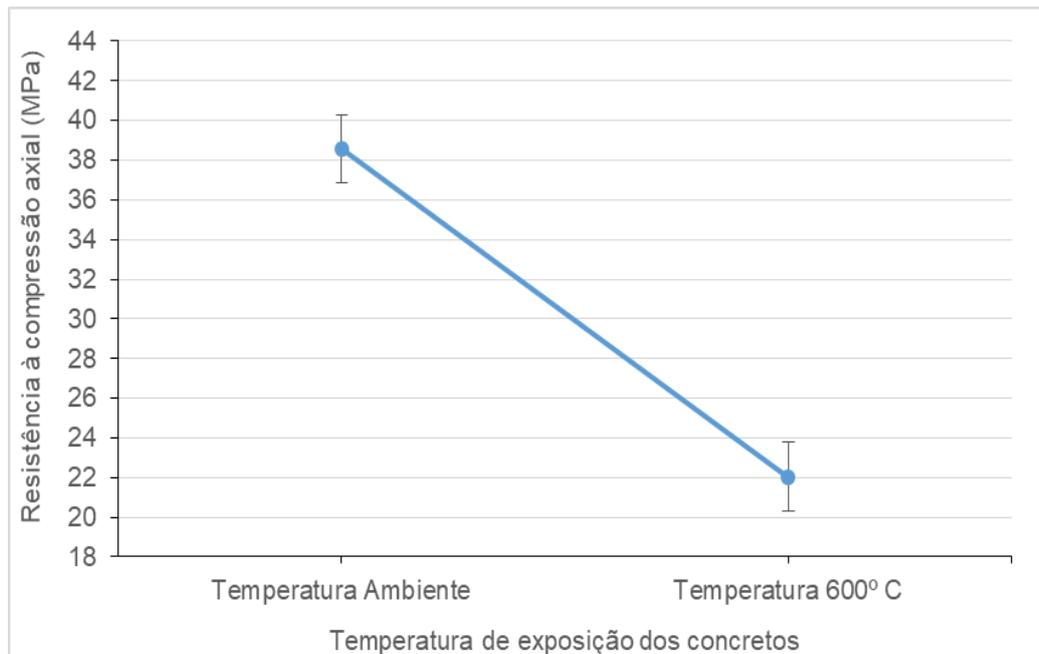
ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	22032,34	1	22032,34	2716,193	0,000
Teor de Fibra de Polipropileno	5,77	1	5,77	0,712	0,408
Teor de Areia de Vidro	2,12	1	2,12	0,261	0,614
Temperatura	1632,68	1	1632,68	201,280	0,000
Erro	162,23	20	8,11		

Onde: SQ-Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ- Médias Quadradas; p - significância.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de variância (Tabela 6) mostrou que entre os parâmetros independentes estudados (teor de fibra de polipropileno, teor de areia de vidro e temperatura) somente a variável “temperatura” foi significativa (influenciou nos resultados de resistência à compressão axial dos concretos). As demais variáveis independentes não influenciaram nem positivamente e nem negativamente na resistência à compressão axial dos traços investigados.

A Figura 12 apresenta o efeito isolado da variável “temperatura” na resistência à compressão axial dos concretos obtida a partir da análise ANOVA. Observa-se nesta imagem que a exposição dos concretos a 600°C promoveu uma redução significativa da propriedade avaliada, conforme já discutido.

Figura 12 - Efeito isolado da temperatura na resistência à compressão axial

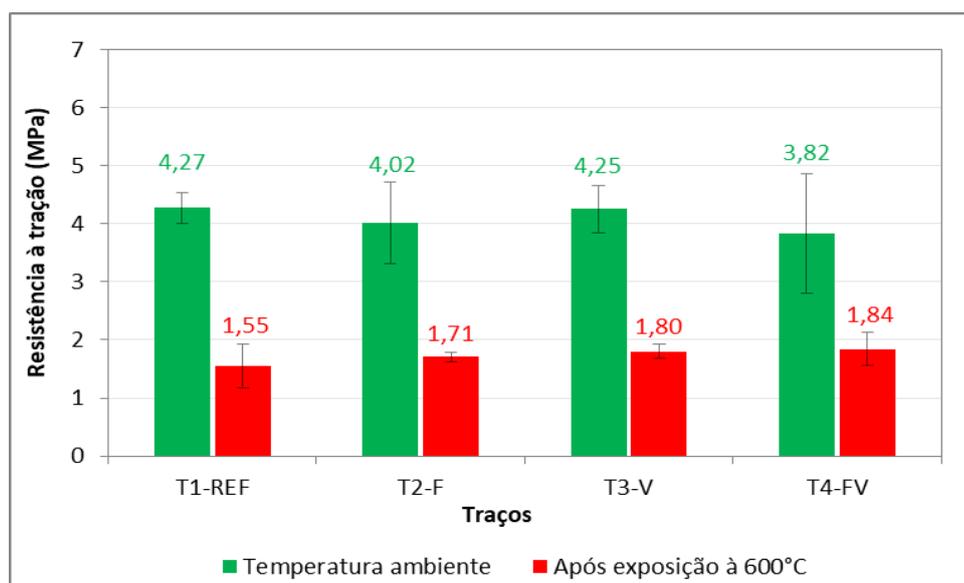


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Aos 32 dias de idade, determinou-se a propriedade mecânica de tração por compressão diametral através do rompimento de 6 amostras para cada traço estudado, 3 destas foram expostas a temperatura de 600°C antes da ruptura, já as demais não sofreram nenhum tipo de exposição. Os resultados médios para cada situação encontram-se dispostos na Figura 13.

Figura 13 - Resistência média aos 32 dias antes e após exposição a 600°C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os concretos em mesmas condições de temperatura observa-se que os concretos T2-F, T3-V e T4-FV apresentaram, em geral, resultados próximos aos de sua referência. Porém, comparando os dados dos concretos expostos à temperatura ambiente com os concretos expostos à 600°C, observa-se uma perda gradual de resistência a tração por compressão diametral para todas as misturas. O traço T1-REF perdeu cerca de 63,7% de sua resistência inicial, enquanto os traços T2-F, T3-V e T4-FV apresentaram um decaimento na sua resistência inicial de 57,7%, 57,6% e 51,8%, respectivamente.

Para complementação da discussão dos resultados foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com um nível de confiança de 95% (Tabela 7).

Tabela 7: ANOVA – Resistência à tração por compressão diametral

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	202,8854	1	202,8854	894,4741	0,000
Teor de Fibra de Polipropileno	0,0096	1	0,0096	0,0423	0,839
Teor de Areia de Vidro	0,0888	1	0,0888	0,3916	0,538
Temperatura	33,6540	1	33,6540	148,3727	0,000
Erro	4,5364	20	0,2268		

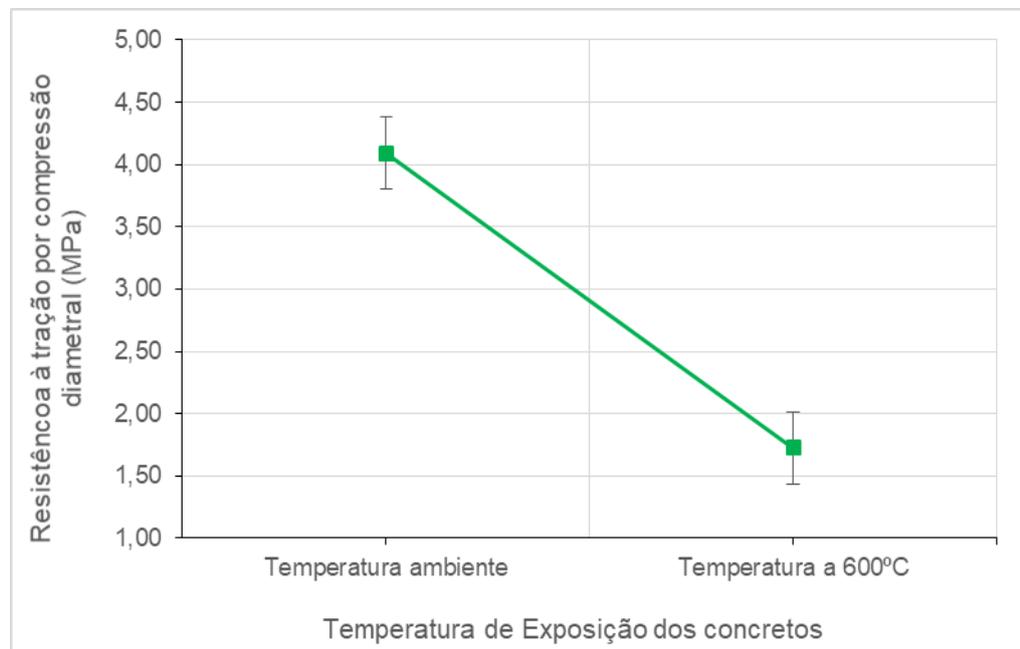
Onde: SQ-Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ- Médias Quadradas; p - significância.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise ANOVA (Tabela 7) indicou que entre as variáveis independentes estudadas, somente a variável “temperatura” influenciou de forma significativa a propriedade avaliada (ft).

A Figura 14, gerada a partir da ANOVA, indica a influência desta variável na resistência à tração por compressão diametral das misturas estudadas. Observa-se que a exposição dos concretos à temperatura de 600°C promoveu uma redução significativa da propriedade avaliada.

Figura 14 - Efeito isolado da temperatura na resistência à tração por compressão diametral



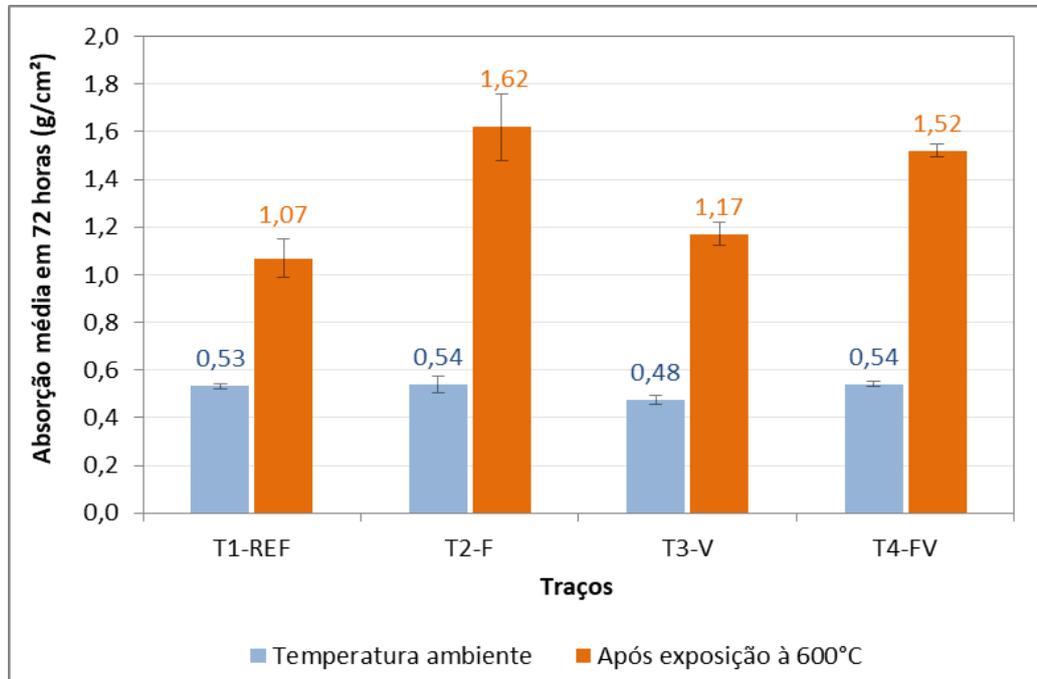
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Absorção de água por capilaridade

Com finalidade de averiguar não só a durabilidade dos concretos estudados, mas também a modificação dos poros presentes nos concretos após o aquecimento realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade para cada traço estudado antes e após exposição à temperatura de 600°C. De acordo com Neville (2015), a durabilidade dos concretos está diretamente associada com a estrutura de poros presentes no mesmo, ou seja, com a facilidade no qual os fluidos, sejam estes líquidos ou gases entram e se locomovem no interior do elemento de concreto.

Os resultados de absorção média para cada traço após 72 horas de imersão parcial dos copos de prova estão apresentados na Figura 15.

Figura 15 - Absorção média antes e após exposição a 600°C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em temperatura ambiente nota-se que a absorção pouco variou para os traços T2-F, T3-V e T4-FV quando comparados com o traço referência T1-REF, entretanto após exposição dos concretos a temperatura de 600°C, houve um aumento de absorção mais significativo para os traços T2-F e T4-FV, enquanto os traços T1-REF e T3-V obtiveram comportamentos semelhantes.

O aumento na absorção obtida para um mesmo traço após o aquecimento a 600°C, evidenciado até mesmo para os concretos sem adição de fibras, mesmo que com menor intensidade, pode estar relacionado com o aumento de porosidade do concreto causado pela fissuração do mesmo após aquecimento. Rocha, Carneiro e Moreira (2018) relatam em sua pesquisa que o concreto sem adição de fibras sofreu um elevado aumento na porosidade com o aquecimento até 900°C, causado pela fissuração do concreto provocada pela temperatura elevada.

O acréscimo percentual mais acentuado na absorção dos traços T2-F e T4-FV quando confrontado com o traço referência T1-REF após a exposição a 600°C já era esperado. Bernardi (2003) explica que quando o concreto atinge temperaturas médias em torno de 150°C, as fibras de polipropileno se fundem deixando espaços

vazios na estrutura, fazendo com que o concreto se torne mais poroso. Santos (2006) também afirma que a permeabilidade do concreto está diretamente relacionada com a estrutura e quantidade de poros presentes no mesmo. Segundo o autor, o aumento de porosidade provocado a partir da fusão das fibras à medida que a temperatura se eleva tende a fazer com que o concreto absorva uma maior quantidade de água.

Para a complementação da discussão dos resultados, é apresentada na Tabela 8 a análise ANOVA realizada para a propriedade de absorção de água por capilaridade.

Tabela 8: ANOVA – Absorção de água por capilaridade

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	20,95157	1	20,95157	1189,978	0,000
Areia de vidro	0,00094	1	0,00094	0,054	0,819
Fibra de Polipropileno	0,35590	1	0,35590	20,214	0,000
Temperatura	4,05498	1	4,05498	230,309	0,000
Erro	0,35213	20	0,01761		

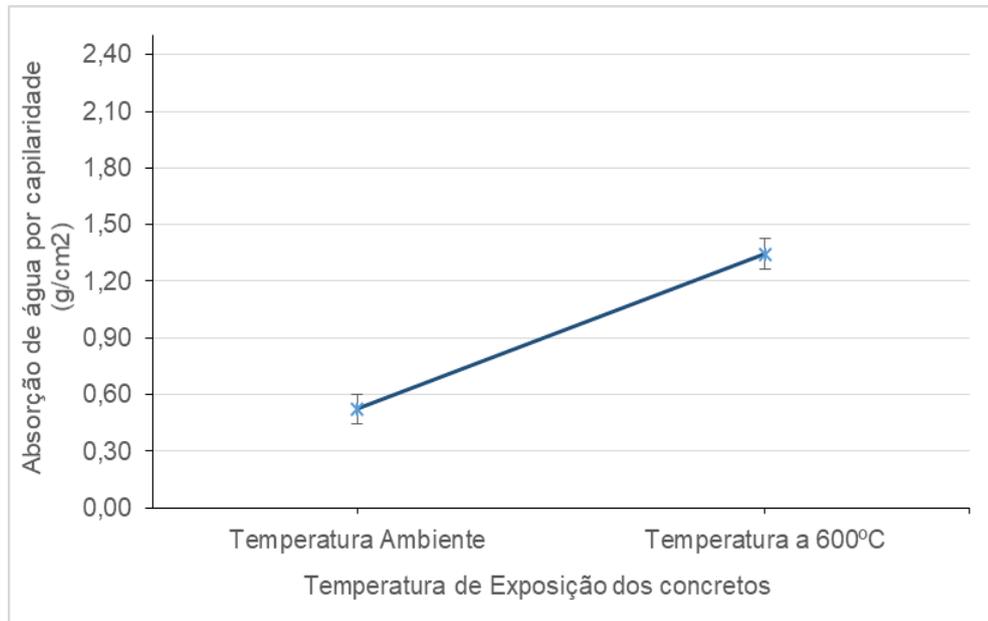
Onde: SQ-Soma dos Quadrados; GL- Grau de Liberdade; MQ- Médias Quadradas; p - significância.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de variância comprovou que o uso de fibras de polipropileno e a temperatura de exposição dos concretos a 600°C interferiram de forma significativa na absorção dos concretos. A incorporação de areia de vidro no teor estudado não se mostrou significativa. Ou seja, não interferiu nos resultados.

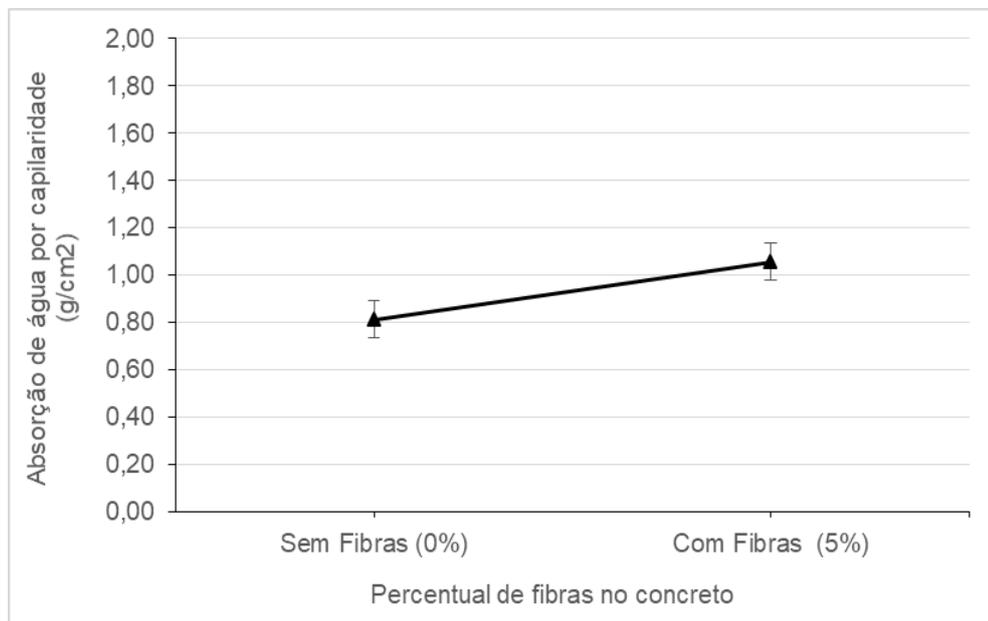
O efeito isolado das variáveis “Fibra de Polipropileno” e “Temperatura” – obtidos a partir da análise ANOVA – são apresentados nas Figuras 16 e 17. Os gráficos indicam que a exposição dos concretos à elevada temperatura e o uso de fibras de polipropileno promoveram aumento significativo da absorção de água nos concretos. Como já discutido na seção 2, a exposição de concretos a temperaturas elevadas promovem mudanças na matriz. Aliados a isso, ocorre à fusão das fibras para aliviar as tensões internas da estrutura, em contrapartida, formam-se caminhos que facilitam a entrada de água no concreto.

Figura 16 - Efeito isolado da temperatura na absorção de água



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Efeito isolado da fibra de polipropileno

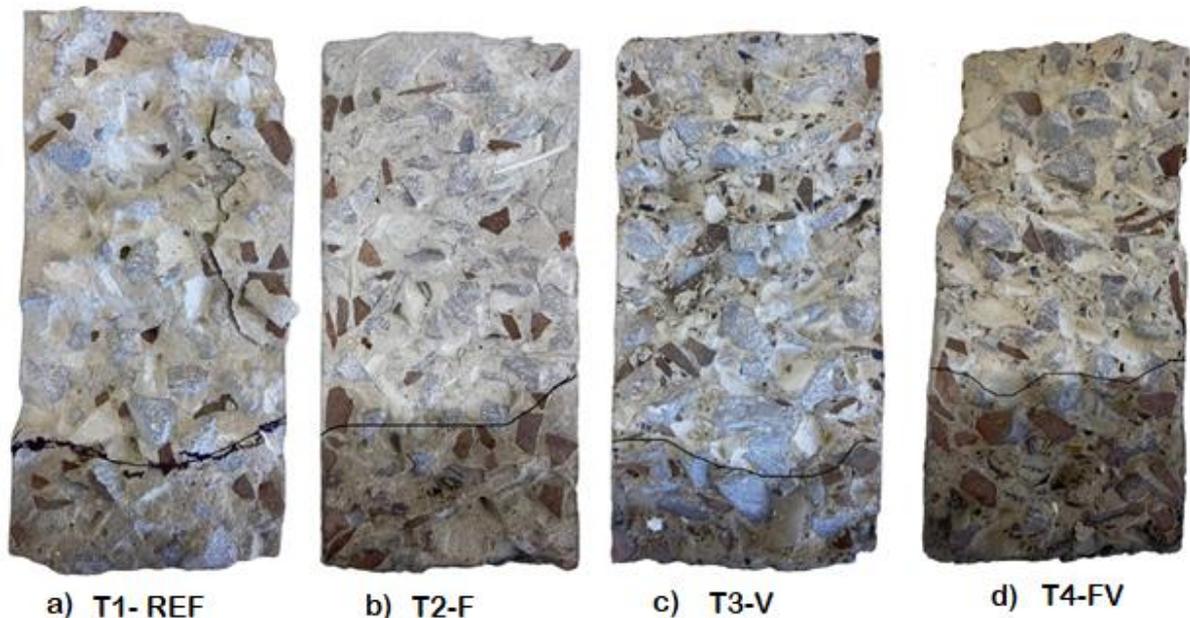


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Ascensão de água nos concretos

Após a finalização do ensaio de absorção de água por capilaridade, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral para a análise da ascensão de água nos corpos de prova. Nesta etapa, somente foi possível visualizar a ascensão de água nos concretos expostos à elevada temperatura (600°C), conforme apresentado na Figura 18. Para os concretos que permaneceram em temperatura ambiente, não foi possível distinguir visualmente essa ascensão.

Figura 18 - Ascensão de água nos concretos após exposição a 600°C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de ascensão média de água dos traços T1-REF, T2-F, T3-V e T4-FV foram de 4,5 cm, 7,0 cm, 4 cm e 7,5 cm, respectivamente. Entre os concretos estudados, observa-se que os traços com a incorporação de fibras (T2-F e T4-FV) apresentaram maior ascensão de água após a exposição à elevada temperatura, como o esperado. Os resultados podem ser explicados pelo fato das fibras fundirem após atingirem temperaturas em torno de 159-179°C, criando caminhos preferenciais e facilitando a entrada de água no concreto, conforme já discutido.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa apresentou como objetivo principal avaliar o comportamento de concretos convencionais (referência) e alternativos (com agregado miúdo de vidro cominuído) com e sem adição de fibras de polipropileno e submetidos a uma situação de incêndio. Para alcançar o objetivo proposto, o programa experimental foi desenvolvido a fim de avaliar algumas propriedades mecânicas e de durabilidade de amostras de concreto submetidas à elevada temperatura, comparando posteriormente as suas propriedades com às das amostras que não foram aquecidas (amostras de referência). As considerações sobre os resultados da pesquisa são expostas na sequência.

Conclui-se que em temperatura ambiente, todos os traços alcançaram a resistência à compressão axial esperada ($\geq 35\text{MPa}$) aos 28 dias.

Após a exposição de parte dos concretos à elevada temperatura (600°C) não foi visualizado perda de massa por lascamento (*spalling*) dos corpos de prova para nenhum dos traços estudados. Dessa forma, não foi possível avaliar de forma direta a ação das fibras de polipropileno frente a esse fenômeno. A exposição dos concretos a uma situação de incêndio (temperatura de 600°C) fez com que a propriedade mecânica de resistência à compressão axial dos concretos decaísse de forma significativa, como comprovado pela análise estatística ANOVA. Para a resistência à compressão axial, observou-se que o concreto com vidro cominuído e o concreto referência apresentaram resultados semelhantes após o aquecimento, o que torna atraente a substituição de 40% da areia natural por vidro cominuído nas condições estudadas. Observou-se que a resistência à tração dos concretos produzidos não apresentou grandes variações em temperatura ambiente, pois todos os traços apresentaram resistências semelhantes. Entretanto, após exposição a 600°C , a variante temperatura influenciou significativamente na queda da resistência à tração para todos os traços estudados. Conforme apresentado nos resultados da ANOVA, a incorporação de vidro cominuído nas misturas não promoveu mudanças significativas nas propriedades mecânicas avaliadas.

Após o aquecimento, também foi observada a degradação das fibras de polipropileno nos traços T2- F e T4-FV. As degradações das fibras promoveram uma maior absorção de água por capilaridade, comprovando que as mesmas contribuem para aumentar a permeabilidade do concreto após fusão. De acordo com a análise

ANOVA realizada, a adição de fibras nos concretos e a temperatura de 600°C influenciou significativamente no aumento de absorção de água por capilaridade.

Além do exposto, acredita-se que frente a uma situação de incêndio, as fibras de polipropileno podem vir a ser eficientes, uma vez que depois de fundidas promovem o aumento da porosidade em uma estrutura de concreto, permitindo uma migração eficiente dos gases gerados no interior da estrutura para o exterior, impedindo o acúmulo de pressão interna, evitando o lascamento do concreto (*spalling*). Em contrapartida, percebeu-se que a incorporação de fibras pode prejudicar a durabilidade de concretos após exposição a elevadas temperaturas, devido ao aumento da absorção de água gerado após sua fusão.

A utilização de vidro cominuído substituindo parcialmente a areia natural para fabricação de concretos mostrou-se uma alternativa promissora, que pode contribuir para diminuir a extração de recursos naturais finitos do ambiente, reduzindo impactos ambientais e colaborando para um desenvolvimento sustentável. Nesta pesquisa, o traço com substituição de 40% da areia natural por vidro cominuído foi que apresentou os melhores resultados, pois foi observado comportamento semelhante ao concreto referência (sem substituição) para as propriedades de resistência à compressão axial e a tração por compressão diametral, tanto em temperatura ambiente, quanto após exposição à 600°C, onde a resistência decaiu com o aquecimento, porém, permaneceu semelhante à do concreto sem substituição (concreto de referência). De acordo com análise ANOVA realizada, o teor de vidro utilizado não influenciou para o decaimento das propriedades mecânicas investigadas.

Em suma, considerando os traços estudados, para as condições de aquecimento impostas (600°C) nesta pesquisa, conclui-se que não foi possível avaliar a ação das fibras de polipropileno frente ao *spalling*. Para melhor analisar os efeitos das fibras de polipropileno frente a esse fenômeno serão necessários novos estudos, com aplicação de temperaturas mais elevadas nas quais o fenômeno possa vir a ser evidenciado. Apesar das fibras de polipropileno serem indicadas para a minimização do lascamento explosivo, foi observado que após a sua fusão, as mesmas induziram um aumento significativo da absorção de água nos concretos. Com relação à substituição realizada da areia natural pelo vidro cominuído, conclui-se que, para os concretos sem a presença de fibras, a substituição mostrou-se viável

para as condições testadas, pois apresentou comportamento semelhante ao concreto referência. Referente ao uso de vidro cominuído em concretos, apesar dos resultados promissores encontrados, reforça-se que os resultados são válidos para as condições e materiais empregados nesta pesquisa. Novos estudos devem ser realizados para a validação da aplicação desse material alternativo em concretos.

6 SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

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

- Estudar as propriedades de concretos produzidos com outras taxas de vidro cominuído substituindo a areia natural;
- Estudar a eficiência das fibras de polipropileno contra o fenômeno do *spalling*, através de testes com temperaturas superiores a 600°C;
- Estudar a eficiência das fibras de polipropileno contra o fenômeno do *spalling*, através de testes com diferentes taxas de aquecimento, podendo utilizar a taxa recomendada pela curva de incêndio-padrão ISO 834;
- Estudar as propriedades de concretos produzidos com outros materiais alternativos substituindo parcialmente o agregado miúdo ou graúdo;

REFERÊNCIAS

ALVARENGA JÚNIOR, Luiz Carlos de; SIMÃO, Diego Henrique; FONSECA, Fabio Braga da. Análise da resistência característica a compressão do concreto produzido com vidro como parte do agregado miúdo. **Revista Engenharia Civil e Tecnologia**, v.1, n.1, p. 1-18, mar. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, ABNT, 2015.

_____. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, ABNT, 2017.

_____. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

_____. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, ABNT, 2021.

_____. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, ABNT, 2022.

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

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

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

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

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

BAILEY, Colin. Structural fire design: core or specialist subject?. **The Structural Engineer**, v. 82, n. 9, p. 32-38, maio 2004.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibras de Aramida Kevlar**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2003.

BRAGA, Fabiana Moraes; RAMOS, Isaac Martins. **Análise da Resistência do Concreto com Adição de Vidro Moído após Exposição a Elevadas Temperaturas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Evangélica de Jaraguá, Jaraguá, 2019.

BRAGA, Gabriel Willian da Silva. **Estudo do Comportamento do Concreto com Fibras de Polipropileno Submetido a Altas Temperaturas**. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia) – Universidade Católica de Petrópolis. Programa de Mestrado Profissional em Gestão de Sistemas de Engenharia, Petrópolis, 2020.

CORREIA, João Victor Freitas Barros et al. Influência da Substituição da Areia Natural pelo Vidro no Desempenho Mecânico do Concreto. **Engineering Sciences**, v. 6, n. 1, p. 1-9, dez. 2017/mai. 2018.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta. O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio—uma revisão crítica. In: Congresso Brasileiro de Concreto, 44. 2002, Belo Horizonte. **Anais** [...]. Belo Horizonte: IBRACON, 2002.

COSTA, Carla Neves; SILVA, Valdir Pignatta. Considerações sobre a segurança das estruturas de concreto em situação de incêndio. In: Seminário Internacional NUTAU: Demandas Sociais, Inovações Tecnológicas e a Cidade. 2004, São Paulo. **Anais**[...]. São Paulo: NUTAU/FAUUFSP, 2004.

COSTA, Kevin de Matos; ALMEIDA, Raíssa Coelho; MOREIRA, Thiago A. de Sousa. Análise do Desempenho Mecânico de Concretos e Argamassas Mediante d Substituição Parcial da Massa do Agregado Miúdo (Areia) por Vidro Moído Oriundo de Garrafas de Cerveja *Long Neck*. **RCT - Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 6, p. 1-12, ago. 2020.

DIAS, Alisson Rodrigues de Oliveira et al. Comportamento do Concreto Submetido a Elevadas Temperaturas. **Matéria**, v. 25, n. 2, p. 1-14, 2020.

DIAS, Dainer Marçal. **Concreto Reforçado com Fibras Poliméricas Submetido a Temperaturas Elevadas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Vitória, 2019.

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

FÉLIX, Afonso Henrique Oliveira. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltrióxissilano como agente de adesão**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2002.

FEVE - THE EUROPEAN CONTAINER GLASS FEDERATION. **Glass packaging in the top choice for environmentally conscious consumers, new survey reveals.** 2020. Disponível em: <https://feve.org/wp-content/uploads/2020/04/FEVE-InSites-press-release22042020.pdf>. Acesso em 01 jun. 2022.

FIGUEIREDO, Antonio De. **Concreto com fibras.** In: ISAIA, Geraldo C. (Editor). *Concreto, ensino, pesquisa e realizações.* São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2005. v. 2, p. 1195-1225.

GEYER, Rejane Maria Tubino. **Estudo Sobre a Potencialidade de Uso das Escórias de Aciaria como Adição ao Concreto.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2001.

GIL, A. M. *et al.* Análise experimental do fenômeno de deslocamento em pilares de concreto armado pré-fabricados submetidos a elevadas temperaturas. **RIEM - Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 4, p. 856-875, jul./ago. 2018.

INGHAM, Jeremy. Forensic engineering of fire-damaged structures. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**. v. 162, n. 5, p. 12-17, maio 2009.

KALIFA, Pierre; MENNETEAU, Francois-Dominique; QUENARD, Daniel. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. **Cement and concrete research**, v. 30, n. 12, p. 1915-1927, dez. 2000.

KIRCHHOFF, Larissa Degliuomini. **Estudo Teórico-experimental da Influência do Teor de Umidade no Fenômeno de Spalling Explosivo em Concretos Expostos a Elevadas Temperaturas.** 2010. Tese (doutorado em Engenharia Civil), Área de Estruturas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em engenharia Civil, Porto Alegre, 2010.

LEVY, Salomon Mony. **Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos, Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria.** 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.

LIMA, Caio Ivson Vasconcelos *et al.* *Concreto e Suas Inovações.* **Cadernos de Graduação**, v. 1, n. 1, p. 31-40, maio 2014.

LIMA, Rogerio Cattelan Antochaves De. **Investigação Do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas.** 2005. Tese (doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2005.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves et al. Efeito de altas temperaturas no concreto. In: Seminário De Patologias Das Edificações – Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, 2. 2004, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2004.

LIOTTO, Pedro Felix. **Concreto com a Substituição Parcial de Agregado Miúdo por Vidro Reciclado**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Manaus, 2019.

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, n. 320, p. 318-324, dez. 2005.

MATOS, João Guilherme de Pina; CAMPOS, Thiago Silva; DIAS, Jéssica Nayara. Concreto com Fibras de Polipropileno Submetido a Testes de Alta Temperatura. **Simpósio de Ciências e Engenharias - SINACEN**, v. 6, n. 2, p. 34-40, out. 2021.

METHA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 670 p.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2015. 912 p.

NINCE, Andréia Azeredo. **Lascamento do Concreto Exposto a Altas Temperaturas**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

NINCE, Andréia; FIGUEIREDO, Antônio D.; BITTENCOURT, Túlio. Absorção e Índice de Vazios em Concreto Reforçado com Fibra de Polipropileno Exposto a 400°C e 600°C. In: Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, 5. 2003, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: USP, 2003.

OGUNDAIRO, T. O. *et al.* Uso Sustentável de Resíduos Reciclados de Vidro como Material Alternativo para a Construção Civil – Uma Revisão. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 640, p. 1-12, jun. 2019.

PANCAR, Erhan Burak. Reducing High Temperature Effect on Concrete by Changing Concrete Mixture. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 6, n. 4, p. 258-262, nov. 2017.

PEREIRA, Eduardo Corrêa. **Resistência à Compressão de Concretos Microfissurados: Influência da Incorporação de Vidro Cominuído e do Tipo de Cura**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2022.

PHAN, Long T.; CARINO, Nicholas J. Fire performance of high strength concrete: research needs. In: ASCE World Structural Engineering Conference. 2000, Filadélfia. **Anais [...]**. Filadélfia: National Institute of Standards and Technology – NIST, 2000.

RIGHI, Débora *et al.* Efeitos da Substituição de Areia por Vidro Moído no Comportamento de Concretos em Elevadas Temperaturas. **Engenharia Estudo e Pesquisa**, v. 11, n. 2, p. 28-35, jul./dez. 2011.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. **Materials and Structures/Matériaux et Constructions**, v. 33, n. 4, p. 219-223, maio 2000.

ROCHA, Celso Moreira da; CARNEIRO, Luis Antonio Vieira; TEIXEIRA, Ana Maria Abreu Jorge. Comportamento de Concretos com Fibras de Poliolefina Sob Elevadas Temperaturas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 3, p. 219-233, fev. Mar. 2018.

SANTOS, Lourdimine. **Avaliação da Resistividade Elétrica do Concreto como Parâmetro para a Previsão da Iniciação da Corrosão Induzida por Cloretos em Estruturas de Concreto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

SARZALEJO, Antonio. *et al.* **Fibras como Elemento Estrutural para Reforço de Concreto – Manual Técnico**. Jundiaí, Maccaferri, 2008. 238 p.

TRAMONTIN, Marcos; Godinho, Daiane dos Santos da Silva. **Análise Residual e Macroestrutural Do Comportamento do Concreto Adicionado com Fibras de Polipropileno Submetido a Elevadas Temperaturas**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2018.

TRENTIN, Priscila Ongaratto *et al.* Substituição Parcial de Agregado Miúdo por Resíduo de Vidro Moído na Produção de Argamassa. **Matéria**, v. 25, n. 1, p. 1-14, 2020.

VIAN, Daniel. **Análise do comportamento mecânico e durabilidade de concretos produzidos com vidro moído**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.

VIEIRA, Andreia; GODINHO, Daiane dos Santos da Silva. **Análise Macro E Microestrutural Do Comportamento do Concreto Reforçado com Fibras de Polipropileno Submetido a Elevadas Temperaturas**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.