

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MARIA EDUARDA FANTIN DACHERI

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM
POLITEREFTALATO DE ETILENO SUBMETIDOS A ELEVADAS
TEMPERATURAS**

**Alegrete
2019**

MARIA EDUARDA FANTIN DACHERI

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM
POLITEREFTALATO DE ETILENO SUBMETIDOS A ELEVADAS
TEMPERATURAS**

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: Simone Dornelles Venquiaruto

Coorientador: Marcelo de Oliveira

**Alegrete
2019**

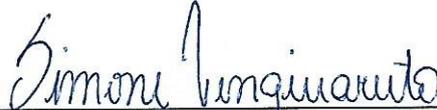
MARIA EDUARDA FANTIN DACHERI

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM
POLITEREFTALATO DE ETILENO SUBMETIDOS A ELEVADAS
TEMPERATURAS**

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: 27 de novembro de 2019.

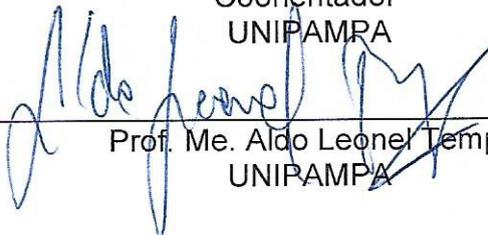
Banca examinadora:



Prof. Dra. Simone Bornelles Venquiaruto
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Marcelo de Jesus Dias de Oliveira
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. Me. Aldo Leonel Temp
UNIPAMPA



Eng. Esp. Danielli Duó

Dedico este trabalho a minha irmã, Isadora e ao meu namorado, Fabiano, por todo amor e compreensão durante minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares que, embora não tenhamos passado muito tempo juntos nos últimos anos, certamente estavam presentes em pensamento.

A minha irmã Isadora, por entender mesmo pequena os motivos que me fizeram sair de casa e buscar um futuro melhor, sendo minha motivação todos os dias.

Ao meu namorado Fabiano Oliveira, que foi o meu maior incentivador, não permitindo que eu desistisse nos momentos difíceis, pela ajuda no laboratório e pela paciência, compreensão e amor durante todo este período, não teria conseguido sem você.

Aos meus avós, pelas orações, cuidado e amor que transmitiram a mim durante toda a minha vida.

Aos meus amigos e colegas, que dividiram experiências, incentivos e apoio durante esta jornada.

Aos professores por todo o ensinamento transmitido ao longo do curso. Em especial a minha orientadora Dra. Simone Dornelles Venquiaruto pelo tempo dedicado a mim, pela transmissão de ensinamentos e palavras de incentivo, que tornaram esse trabalho possível e ao meu coorientador Eng. Marcelo de Oliveira pelo conhecimento transmitido e auxílio durante todos os ensaios realizados.

Aos técnicos Raquel e Luizele por todo o suporte durante a realização dos ensaios.

“Aprendi que depois de dar o primeiro passo, tanto faz se o próximo for para frente ou para trás, a marca da primeira pisada vai ficar no mesmo lugar”.

Autor desconhecido

RESUMO

A construção civil atualmente consome grande quantidade de recursos naturais, sendo responsável por parte da degradação ambiental que ocorre no mundo. Em função da necessidade de reverter ou minimizar esse cenário, a introdução de novos materiais em matrizes cimentícias - como o Politereftalato de Etileno (PET) -, tem se mostrado uma boa opção. No entanto, para que seu uso seja difundido é necessário avaliar as propriedades da matriz cimentícia com a incorporação desse material e o seu comportamento frente aos ambientes agressivos, ao qual o concreto pode ser exposto durante sua vida útil. Um incêndio se enquadra nesse contexto, pois ao ser submetido a elevadas temperaturas, o concreto passa por transformações que podem comprometer a capacidade de suporte da estrutura, podendo levá-la ao colapso. Diante do exposto, o presente trabalho tem como intuito avaliar, algumas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com substituição parcial de areia natural por areia de PET submetidos a distintos gradientes de temperatura. A partir de um traço referência (sem PET), realizou-se a confecção de mais dois concretos com substituição parcial em volume (teores de 20% e 50%) da areia natural por areia de PET. Após a confecção dos concretos e cura submersa por 28 dias, os concretos foram expostos a diferentes gradientes temperaturas (200°C, 400°C e 900°C), para posteriormente terem suas propriedades avaliadas. Verificou-se que os concretos sofreram perda significativa das propriedades mecânicas e de durabilidade quando expostos a temperaturas superiores a 400°C. Os resultados indicaram que a substituição parcial de areia de PET no teor de 20% apresentaram resultados de resistência à compressão axial semelhantes ao traço referência, não havendo redução expressiva dessa propriedade ao serem expostos até a temperatura de 400°C. No entanto, o traço com substituição de 50% de areia de PET se mostrou inviável, pela redução significativa das propriedades avaliadas.

Palavras-Chave: Concreto, areia de PET, incêndio, altas temperaturas.

ABSTRACT

Civil construction currently consumes a large amount of natural resources, being responsible for part of the world's environmental degradation. The introduction of new materials in cementitious matrix - such as Ethylene Polyerephthalate (PET) - has been a good option to reverse or minimize this scenario. However, to spread its use it is necessary to evaluate the properties of cementitious matrix with the incorporation of this material and its behavior against aggressive environments, to which concrete can be exposed during its useful life. A fire fits into this context, because when subjected to high temperatures, the concrete undergoes transformations that can compromise the carrying capacity of the structure, which can lead it to collapse. Considering the above, the present work aims to evaluate some mechanical and durability properties of concrete produced with partial replacement of natural sand by PET aggregate, submitted to different temperature gradients. From a reference trait (without PET), two more concrete were made, which have partial volume replacement (20% and 50%) of the natural sand by PET aggregate. After the concreting and submerged curing for 28 days, the concretes were exposed to different temperature gradients (200°C, 400°C and 900°C), so that after they had their properties evaluated. It was verified that the concrete has been suffer significant loss of mechanical properties and durability when exposed to temperatures above 400 ° C. The results have indicated that the partial substitution of 20% PET aggregate have presented axial compressive strength results similar to the reference trait, without significant reduction of this property when exposed to 400°C. However, the 50% substitution trait of PET aggregate proved unfeasible, due to the significant reduction of the evaluated properties.

Keywords: Concrete, PET aggregate, fire exposed, high tempetures.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Alguns dos principais incêndios do Brasil. | 19 |
| Figura 2 - Tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados. | 23 |
| Figura 3 - Lascamento na estrutura. | 28 |
| Figura 4 - Esquema do Programa Experimental | 31 |
| Figura 5 - Agregados miúdos | 33 |
| Figura 6 - Curva granulométrica da areia natural | 35 |
| Figura 7 - Curva granulométrica da areia de PET | 35 |
| Figura 8 - Composição das areias..... | 36 |
| Figura 9 - Curva granulométrica da composição com 20% de PET | 37 |
| Figura 10 - Curva granulométrica da composição com 50% de PET | 38 |
| Figura 11 - Curva granulométrica do agregado graúdo..... | 39 |
| Figura 12 - Corpos de prova desmoldados | 42 |
| Figura 13 - Abatimentos do tronco cone dos traços estudados..... | 43 |
| Figura 14 - Forno elétrico Sanchis | 44 |
| Figura 15 - Equipamento de propagação de onda ultrassônica | 46 |
| Figura 16 - Velocidade de onda ultrassônica para o traço referência | 49 |
| Figura 17 - Fissuras na superfície do traço referência após a exposição a 900°C ... | 49 |
| Figura 18 - Velocidade de onda ultrassônica para o traço 20% de PET | 50 |
| Figura 19 - Velocidade de onda ultrassônica para o traço 50% de PET | 51 |
| Figura 20 - Velocidade de onda ultrassônica dos traços estudados | 52 |
| Figura 21 - Resistência à compressão axial média dos traços estudados | 53 |
| Figura 22 - Resistência à compressão axial em função do teor de PET | 55 |
| Figura 23 - Resistência à compressão axial em função da temperatura..... | 56 |
| Figura 24 - Absorção de água e índice de vazios a 23°C | 58 |
| Figura 25 - Absorção de água e índice de vazios a 200°C | 58 |
| Figura 26 - Absorção de água e índice de vazios a 400°C | 59 |
| Figura 27 - Absorção de água e índice de vazios a 900°C | 59 |
| Figura 28 - Absorção de água por imersão a total média dos traços estudados..... | 60 |
| Figura 29 - Absorção de água por imersão total em função do teor de PET..... | 61 |
| Figura 30 - Absorção de água por imersão total em função da temperatura | 62 |
| Figura 31 - Traços estudados nas temperaturas de 23°C e 200°C | 63 |
| Figura 32 - Traços estudados na temperatura de 400°C | 64 |
| Figura 33 - Impurezas presentes no concreto | 64 |
| Figura 34 - PET no interior do concreto a 400°C..... | 65 |
| Figura 35 - Traços estudados na temperatura de 900°C | 65 |
| Figura 36 - Vazios ocasionados pela degradação da areia de PET superficial..... | 66 |
| Figura 37 - PET no interior do concreto -Traço 50PET- submetido a uma temperatura de 900°C | 67 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Levantamento dos principais incêndios no Brasil..... | 20 |
|---|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland CPIV | 32 |
| | 32 |
| Tabela 2 - Caracterização da areia natural | 34 |
| Tabela 3 - Caracterização da areia de PET | 34 |
| Tabela 4 - Caracterização da composição com 20% de areia de PET | 36 |
| Tabela 5 - Caracterização da composição com 50% de areia de PET | 37 |
| Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo | 39 |
| Tabela 7 - Traços utilizados para a produção dos concretos | 41 |
| Tabela 8 - Quantitativo de corpos-de-prova (CPs) por tipo de ensaio | 42 |
| Tabela 9 - Trabalhabilidade dos traços | 43 |
| Tabela 10 - Temperaturas e umidades relativas do ar durante as moldagens | 43 |
| Tabela 11 - Tempo de permanência na mufla | 45 |
| Tabela 12 - Massa específica dos concretos no estado fresco | 47 |
| Tabela 13 - Massa específica seca | 48 |
| Tabela 14 - Análise ANOVA da resistência à compressão axial | 54 |
| Tabela 15 - Análise ANOVA da resistência à compressão axial até 400°C | 56 |
| Tabela 16 - Teste de Duncan | 57 |
| Tabela 17 - Análise ANOVA da absorção de água por imersão total | 61 |
| Tabela 18 - Análise ANOVA de absorção de água por imersão total até 400°C | 62 |
| Tabela 19 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa em relação ao teor de PET | 69 |
| | 69 |
| Tabela 20 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa em relação a temperatura de 23°C a 400°C | 69 |
| Tabela 21 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa em relação a temperatura de 400°C a 900°C | 70 |

LISTA DE SIGLAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABIPET - Associação Brasileira da Indústria de PET

NBR - Norma Brasileira

PET - Politerftalato de Etileno

PPCI - Planos de Proteção e Prevenção Contra Incêndios

TRRF – Tempo Requerido de Resistência ao Fogo

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | Objetivos | 17 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 17 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos | 17 |
| 1.2 | Justificativa | 17 |
| 1.3 | Estrutura do trabalho | 18 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 2.1 | O incêndio e as suas consequências no Brasil | 19 |
| 2.2 | Obras de engenharia e o risco de incêndio..... | 21 |
| 2.3 | Comportamento dos materiais componentes do concreto em elevadas temperaturas..... | 23 |
| 2.3.1 | Água..... | 23 |
| 2.3.2 | Pasta de cimento Portland..... | 24 |
| 2.3.3 | Agregados | 25 |
| 2.3.4 | Aço..... | 25 |
| 2.4 | Alterações na estrutura do concreto em elevadas temperaturas | 26 |
| 2.4.1 | Lascamento do concreto a elevadas temperaturas..... | 27 |
| 2.5 | Concretos com materiais alternativos submetidos a elevadas temperaturas..... | 29 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS..... | 31 |
| 3.1 | Materiais | 32 |
| 3.1.1 | Cimento Portland..... | 32 |
| 3.1.2 | Agregados miúdos | 33 |
| 3.1.3 | Agregado graúdo..... | 38 |
| 3.1.4 | Água..... | 40 |
| 3.1.5 | Aditivo..... | 40 |
| 3.2 | Procedimento de dosagem | 40 |
| 3.2.1 | Produção dos concretos..... | 41 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.2.2 | Aquecimento dos concretos a diferentes temperaturas | 43 |
| 3.3 | Propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos no estado endurecido | 45 |
| 3.3.1 | Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica | 45 |
| 3.3.2 | Resistência à compressão axial | 46 |
| 3.3.3 | Absorção de água por imersão total | 46 |
| 4 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 47 |
| 4.1 | Massa específica do concreto | 47 |
| 4.2 | Ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica | 48 |
| 4.3 | Resistência à compressão axial | 52 |
| 4.4 | Absorção de água por imersão total | 57 |
| 4.5 | Análise visual das amostras | 62 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 68 |
| 5.1 | Sugestões para trabalhos futuros | 70 |
| | REFERÊNCIAS | 71 |
| | APÊNDICES | 76 |

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP a indústria da construção civil no Brasil entre os anos de 2005 a 2012 passou por um rápido crescimento devido ao desenvolvimento do país, estima-se que o aumento na produção de concreto alcançou 180%. Após 2014, devido ao momento financeiro do país, a construção civil teve uma queda na produção, causando uma instabilidade no setor, porém os índices de desenvolvimento na construção voltaram a subir gradativamente desde 2018 e as previsões para o setor mostram-se otimistas.

É de consenso geral que a construção civil é responsável por parte da degradação ambiental, considerando a extração de recursos minerais e a produção de resíduos. Atualmente, existe uma preocupação geral de tentar minimizar a degradação do meio ambiente.

O impacto que a extração de minerais tem no equilíbrio ambiental torna-se preocupante a medida que as ações humanas são refletidas em alguns processos naturais que ocorrem no ecossistema. Nesse contexto, Canellas (2005) salienta que devido a areia possuir pouco valor aquisitivo, e ter sua substituição de maneira rentável difícil, é amplamente utilizada na construção civil, sendo sua extração possível causadora de impactos no meio ambiente, podendo provocar erosão na margem de rios, além de diminuir a função que possuem de filtro físico e biológico para as águas subterrâneas.

A construção civil apesar de impactar o ambiente, também permite a incorporação de materiais alternativos e novas técnicas construtivas. No entanto, é necessário o aprimoramento de pesquisas, para que os materiais alternativos que apresentem potencialidade para uso, possam ter seu uso validado e difundido no mercado.

A utilização de materiais alternativos como o politereftalato de etileno, conhecido como PET, vem sendo estudado por alguns pesquisadores (Jardim (2016), Moura (2017), Della Flora et al. (2018)) com alguns resultados promissores.

O uso do politereftalato de etileno tem aumentado nas últimas décadas e seu descarte na maioria das vezes não é realizado de forma adequada, tornando necessário a descoberta de um novo destino para esse material. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de PET – ABIPET, foram consumidas cerca de 720

mil toneladas de embalagens de PET em 2014 e somente 314 mil toneladas foram recicladas, o que equivale a cerca 44%. Atualmente estima-se que 51% das embalagens descartadas no Brasil são recicladas, apesar da taxa crescente de reciclagem, a implementação de novas utilizações para o material ainda é importante, pois o PET demora cerca de 400 anos para se decompor na natureza.

Pesquisas de Jardim (2016) com complementação de Della Flora et al. (2018), constataram que a substituição parcial do agregado miúdo natural por areia de PET é viável até uma porcentagem de substituição de aproximadamente 20%, não alterando significativamente as propriedades mecânicas do concreto obtido, sendo assim sua utilização se torna benéfica em relação ao meio ambiente. Apesar de ter resultados positivos nos primeiros estudos, é necessário que outras propriedades do concreto sejam avaliadas, principalmente às relacionadas com a durabilidade do material, considerando o meio que a estrutura está inserida. Uma edificação está sujeita a ações imprevisíveis e excepcionais, como um incêndio. Essas situações devem ser consideradas e analisadas, principalmente quando se pretende validar o uso de um novo material.

Os incêndios sempre são motivos de preocupação, já que é uma ação imprevisível que pode gerar danos catastróficos, como perdas de vida e colapso da estrutura (MARCELLI, 2007). O concreto por ser um material incombustível e possuir baixa condutividade térmica apresenta um comportamento melhor que outros materiais, como o aço, que acima de 400°C perde sua resistência rapidamente.

No entanto, o concreto sofre alterações na sua estrutura quando exposto a elevadas temperaturas, dependendo do grau de exposição e a taxa de temperatura com qual o concreto foi submetido, ele pode sofrer deformações, fissuração e dilatações térmicas, que comprometem a segurança da edificação. Além disso, há pouco conhecimento das consequências da ação do fogo nos novos materiais que estão sendo utilizados na construção civil.

Perante o exposto, o presente trabalho tem o intuito de avaliar o comportamento e as propriedades mecânicas do concreto com substituição parcial de areia de PET, submetidos a elevadas temperaturas, a fim de comparar com o concreto convencional e assegurar a viabilidade de seu uso.

1.1 Objetivos

Os objetivos que norteiam esse trabalho são apresentados nos itens 1.1.1 e 1.1.2, respectivamente.

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento mecânico e durabilidade de concretos com substituição parcial de areia natural por diferentes teores de areia de Politereftalato de Etileno (PET) submetidos a elevadas temperaturas após a idade de 28 dias.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a propriedade de resistência à compressão axial de concretos com e sem a substituição de PET após exposição a elevadas temperaturas, conforme a norma NBR 5739 (ABNT, 2007).
- Avaliar a velocidade de propagação de onda ultrassônica de concretos com e sem substituição de PET antes e após a exposição a elevadas temperaturas, conforme a norma NBR 8802 (ABNT, 2019).
- Avaliar a absorção de água por imersão total de concretos com e sem substituição de PET após exposição a elevadas temperaturas, conforme a norma NBR 9778 (ABNT, 2009).

1.2 Justificativa

Atualmente buscam-se alternativas que possam melhorar os impactos gerados no meio ambiente pela construção civil, seja utilizando materiais alternativos ou reduzindo a extração de recursos naturais.

A substituição parcial de agregado miúdo por areia de PET está atrelada tanto na incorporação de um novo material, barato e que possui quantidade exorbitante, muitas vezes sem um destino adequado, quanto ao fato de contribuir para a diminuição da extração desenfreada de areia para o setor da construção civil.

Diante de pesquisas (Canellas (2005), Jardim (2016), Duó (2017)), que têm comprovado a eficácia desse material frente a esforços mecânicos de compressão, tanto em argamassa quanto em concreto, surge a necessidade de conhecer sua

durabilidade frente a um ambiente agressivo, para que seja possível difundir o seu uso.

Para a validação de um material alternativo, diferentes estudos devem ser realizados, a fim de que se conheçam as modificações que esse material proporciona nas propriedades e comportamento da matriz cimentícia, a qual muda de acordo com o tipo de exposição que está sujeita.

A elevação da temperatura de elementos de concreto causada por um incêndio, tem a capacidade de alterar as características na matriz cimentícia, modificando a microestrutura e a porosidade, podendo gerar fissuras e lascamentos, comprometendo a durabilidade do elemento, assim como a segurança de pessoas quando analisado em relação a uma edificação.

Em função do exposto, o estudo das propriedades do concreto com substituição parcial de areia natural por areia de PET submetidos a elevadas temperaturas, justificam a relevância dessa pesquisa.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em três capítulos. O primeiro capítulo apresenta a introdução, o objetivo principal, os objetivos específicos e a justificativa da pesquisa. O capítulo dois apresenta a fundamentação teórica acerca do assunto, e o capítulo três, a metodologia que será adotada para alcançar os objetivos apresentados e o cronograma com as atividades a serem desenvolvidas. Por fim, apresenta-se as referências bibliográficas consultadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os itens 2.1 a 2.4 apresentam a revisão bibliográfica que embasará a pesquisa desse trabalho.

2.1 O incêndio e as suas consequências no Brasil

O incêndio é considerado uma força destrutiva causada pela propagação de fogo indesejado, que causa milhares de mortes todos os anos, além de causar uma perda financeira considerável, devido à perda de propriedade (BUCHANAN, 2017). Marcelli (2007) define o incêndio como um evento de grande complexidade, o relacionando com o crescimento tecnológico do país, que influencia o uso de equipamentos e materiais combustíveis, além do uso de materiais alternativos como divisórias e forros leves altamente inflamáveis.

Apesar das pessoas não esperarem que ocorra em suas residências ou locais de trabalho, um incêndio pode ocorrer em qualquer tipo de construção, a qualquer momento (BUCHANAN, 2017). Marcelli (2007) destaca que apesar de todo o investimento na segurança contra incêndio, não há como garantir a segurança da estrutura, assim como a das pessoas.

O Brasil possui um histórico de grandes incêndios com consequências graves pois além do dano material, proveniente do colapso das estruturas, provocaram a perda de vidas humanas. A Figura 1 apresenta algumas edificações acometidas por incêndios e o Quadro 1 apresenta um resumo dos principais incêndios em estruturas de concreto armado ocorridos no Brasil ao longo dos anos, com as suas prováveis causas e consequências.

Figura 1 - Alguns dos principais incêndios do Brasil.



Quadro 1 - Levantamento dos principais incêndios no Brasil.

| Ano | Local | Causa | Outras Informações | Consequências | Fonte |
|------|--|--|---|--|----------------------------|
| 1972 | Edifício Andraus | Provavelmente devido a uma sobrecarga no sistema elétrico. | O incêndio iniciou no segundo pavimento e posteriormente se alastrou para todo o edifício, atingindo 5 edifícios vizinhos. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Danos materiais. ➔ 16 mortes. ➔ 330 pessoas feridas. ➔ 300 pessoas resgatadas. | Folha de São Paulo (2017) |
| 1974 | Edifício Joelma | Curto-circuito no 12º andar. | O edifício possuía 25 andares, a maioria ocupados por escritórios que possuíam diversos materiais inflamáveis, como carpetes, divisórias e móveis de madeira. O edifício não possuía saídas de emergência e nem um local apropriado para o pouso de helicópteros. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Danos materiais. ➔ 188 mortes. | Jovem Pan (2015) |
| 1987 | O Edifício CESP- Companhia Energética de São Paulo | Devido ao mal funcionamento de um reator de lâmpada fluorescente no primeiro bloco. | O edifício era composto por dois blocos e por ação da radiação térmica o fogo se propagou para o outro bloco, causando vários focos de incêndio em locais espalhados. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Colapso na estrutura, que resultou na ruína parcial do edifício. ➔ 1 morto. ➔ 300 feridos. | Zona de Risco (2014) |
| 2004 | Edifício Herm Stoltz | Provavelmente devido a um curto-circuito. | Gerou explosões causadas pelo superaquecimento dos gases em combustão. O fogo só foi totalmente extinguido 27 horas depois do início. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Danos materiais. ➔ Destruição dos últimos 6 andares do edifício. | Folha de São Paulo (2004) |
| 2013 | Boate Kiss | O uso de um sinalizador provocou fogo na espuma de isolamento acústico no teto, gerando uma fumaça altamente tóxica. | Os extintores não funcionaram e os alvarás de funcionamento do local estavam vencidos. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Danos materiais. ➔ 242 mortos. ➔ 636 feridos. | O Globo (2013) |
| 2018 | Edifício Wilson Paes de Almeida | Curto-circuito no 5º andar. | O edifício apresentava ocupação irregular, não possuindo extintores de incêndio, além de possuir instalações elétricas clandestinas. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Colapso da estrutura. ➔ 7 mortos. ➔ Dano nas edificações vizinhas. | G1 SP (2019) |
| 2018 | Museu Nacional | Sobreaquecimento de ar condicionado causado por curto circuito. | Apresentava deficiências na segurança contra incêndio e na infraestrutura. | <ul style="list-style-type: none"> ➔ Perda de 90% do acervo. | Correio Braziliense (2018) |

Sousa e Silva (2015) relembram que antes dos incêndios dos edifícios Andraus e Joelma não haviam normas rígidas de segurança contra o fogo, pois não haviam ocorridos grandes incêndios com grande quantidade de perda de vidas que preocupassem as autoridades.

Incêndios nos últimos anos como o na Boate Kiss, no edifício Wilton Paes de Almeida e no Museu Nacional tem reacendido a importância da cobrança das autoridades em relação as regulamentações dos planos de proteção e prevenção contra incêndios – PPCI.

O PPCI não garante total segurança contra o fogo, porém é responsável pelo primeiro combate, dificultando a propagação do fogo por meio das tentativas de extinguir as chamas. Menegon (2017) ressalta que o conhecimento do comportamento da estrutura durante e após o incêndio é de suma importância não só para o aperfeiçoamento de normas vigentes, bem como para nortear o trabalho dos órgãos fiscalizadores.

2.2 Obras de engenharia e o risco de incêndio

A segurança humana na presença do fogo deve ser considerada em todos os projetos, seja residencial, público ou industrial. O comportamento real da edificação em contato com o fogo depende de muitos fatores que se ligam entre si, sendo dever do projetista uma análise precisa (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

É possível reduzir os riscos de incêndio, porém nem sempre podem ser evitados, sendo assim várias estratégias foram criadas para reduzir o dano causado e impedir que o colapso da estrutura aconteça, como o uso de aspersores automáticos de incêndio, equipamentos de detecção e alerta de incêndio, saídas de emergência e estruturas com função corta-fogo, que garantem o isolamento térmico e a estanqueidade à passagem de chamas (BUCHANAN, 2017).

Em edificações de concreto que possuam uma resistência convencional, o colapso está associado ao fato da estrutura não conseguir absorver todas as deformações térmicas horizontais causada pelo aumento de temperatura da estrutura, e dificilmente a perda da resistência causará o colapso (LIMA, R., 2005). Apesar disso, Souza (2010) afirma que o aumento de temperatura ocasiona ao

concreto, lascamentos superficiais e fissuras, que podem gerar escoamento do aço da armadura, prejudicando a resistência da estrutura.

O processo que envolve o fogo, é formado por uma reação química entre combustível e o oxigênio (DRYSDALE, 1999). A reação é acionada por uma fonte de calor, que promove uma reação em cadeia até a extinção de um dos componentes. Marcelli (2007) afirma que a duração do sinistro está diretamente ligada a quantidade de materiais combustíveis e na quantidade de oxigênio que pode entrar no ambiente

No início do incêndio, ao começo da ignição, a temperatura passa a aumentar gradualmente, período conhecido com pré-flashover (BUCHANAN, 2017). Durante essa etapa, as chamas estão no material combustível onde se iniciou a combustão e através da transferência de calor - condução, convecção e radiação - se propaga para todo o ambiente (LIMA, R., 2005).

Em um ambiente fechado, a intensidade das chamas aumenta até que todos os materiais estejam expostos ao fogo, é denominado flashover o curto espaço de tempo onde todos os materiais estão em combustão, a partir desse ponto a intensidade e temperatura dos gases crescem até atingir seu pico máximo (BUCHANAN, 2017). Marcelli (2007) relata que esse momento onde ocorre a inflamação generalizada, é considerando o momento mais crítico durando um incêndio.

Segundo Buchanan (2017), após o material combustível ter sido consumido o fogo vai sendo resfriado gradualmente, período pós-flashover, considerado para os projetistas, ainda preocupante, pois a elevada temperatura ainda é mantida por um longo período, agravando as condições dos elementos de concreto.

O incêndio real apresenta todas essas fases, porém não é determinado facilmente, pois apresenta um grande número de variáveis dependentes, como carga de incêndio, ventilação, formato e características térmicas do ambiente.

Sousa e Silva (2015) destacam que para determinar a resistência de um elemento estrutural durante um incêndio é necessário conhecer o comportamento do material durante o incêndio.

A resistência ao fogo de um elemento estrutural é determinada pelo período de tempo que o elemento é capaz de resistir a ação do fogo, este período de tempo é conhecido como o tempo requerido de resistência ao fogo – TRRF e é considerado um parâmetro de projeto. A NBR 14432 (ABNT, 2001) define que para ocupações residenciais que possuem menos de 6 m de altura, o tempo mínimo requerido é de 30 minutos.

2.3 Comportamento dos materiais componentes do concreto em elevadas temperaturas

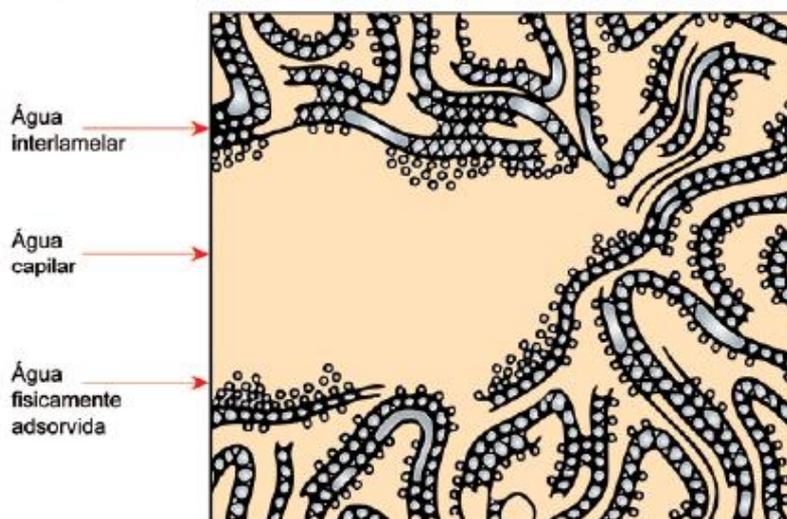
Nos itens 2.3.1 a 2.3.4 são apresentados o comportamento dos materiais utilizados para a produção de concreto quando os mesmos são submetidos a elevadas temperaturas.

2.3.1 Água

A água é fundamental para a formação do concreto, sendo responsável pelas reações de hidratação com o cimento, formando a estrutura resistente do material. (SILVA FILHO, 1994).

Na pasta de cimento hidratada, a água está presente em muitas formas, classificada pela facilidade com que pode ser removida da pasta, sendo: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada, representadas na Figura 2. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 2 - Tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados.



Fonte: Mehta; Monteiro, 2008.

Quando se encontra em processo de aquecimento, a água na forma líquida começa a expandir levemente, quando ultrapassa os 100°C atinge a condição de evaporação, a temperatura se mantém constante até que toda a água no estado líquido seja totalmente evaporada, nesta etapa há um grande aumento de volume da água (LIMA, R., 2005).

A grande liberação de vapores durante o aquecimento, provoca a fissuração no concreto, enfraquecendo-o. Cuoghi (2006) salienta que a pressão de vapor produzida pelo aumento de temperatura tende a ocasionar o surgimento de lascamentos explosivos (Spalling).

2.3.2 Pasta de cimento Portland

A pasta de cimento é resultado da reação química entre cimento Portland e água, essa reação dá origem aos quatro componentes da forma sólida, os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), que constituem de 50 a 60% do volume de sólidos, o hidróxido de cálcio (portlandita), que constitui 20 a 25% do volume, os sulfoaluminatos de cálcio, que ocupam 15 a 20% do volume, e os grãos de clínquer não-hidratados (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Mehta e Monteiro (2008) ressaltam ainda que na pasta de cimento hidratado se encontram vários tipos de vazios, dividindo-os em: espaços interlamelares do C-S-H, compondo 28% da porosidade, os vazios capilares, sendo o espaço que não foi preenchido na hidratação e os vazios de ar, composto por uma pequena quantidade de ar que ficou presa dentro da pasta que contribui para a diminuição da resistência.

Lima, R. (2005) afirma que ao ser aquecida, a pasta de cimento torna-se bastante vulnerável. De acordo com Mehta e Monteiro (2008) o efeito do aumento de temperatura na pasta de cimento depende das condições de umidade e o grau de hidratação da pasta.

A pasta de cimento ao atingir a faixa de 100°C a 200°C começa a perder estabilidade, decorrente das fissuras causadas pela contração da pasta ao eliminar os vapores de água devido ao aquecimento (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002). Aos 300°C a água interlamelar do C-S-H e a água quimicamente combinada se perdem (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Através de estudos, Lima, R. (2005) constatou que entre 100°C e 400°C houve uma pequena perda de massa do concreto, em decorrência da desidratação do C-S-H. Ao ultrapassar a temperatura de 400°C, o autor observou que ocorre uma acentuada perda de peso, devido a desidratação da portlandita e aos 500°C a pasta de cimento passa a sofrer uma degradação em função da decomposição do hidróxido de cálcio. Quando a temperatura chega na casa do 900°C há a completa decomposição do C-S-H. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

2.3.3 Agregados

Os agregados são considerados um enchimento inerte no concreto ocupando cerca de 60 a 80% do volume, as características do agregado são provenientes da composição mineralógica da rocha mãe e de como ela foi exposta ao meio (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Quando expostos a altas temperaturas os agregados apresentam um bom comportamento até os 300°C, após atingir essa temperatura há dilatações excessivas que comprometem o concreto (MARCELLI, 2007). Costa, Figueiredo e Silva (2002) também destacam o aparecimento de tensões internas na interface pasta-agregado, conhecida como zona de transição.

Os diferentes tipos de agregados presentes no concreto apresentam coeficientes de dilatação diferentes, dependendo do tamanho do agregado e da água presente nos poros do agregado, contribuindo para o aparecimento de fissuras (LIMA, R., 2005).

Costa, Figueiredo e Silva (2002) destacam que a condutividade térmica dos agregados varia de acordo com a sua formação, basaltos apresentam baixa condutividade, calcários e dolomitas possuem média condutividade, enquanto quartzos possuem alta condutividade.

Mehta e Monteiro (2008) explicam que ao serem submetidos a temperaturas cerca de 573°C, os agregados silicosos que contêm quartzo (granito ou arenito) passam por uma expansão na ordem de 0,85% devido as transformações do quartzo de α para β , enquanto os agregados calcários sofrem expansões após 700°C.

2.3.4 Aço

O aço não possui um bom comportamento frente a elevadas temperaturas, considerando que a partir de 600°C o aço perde metade de sua resistência total (MARCELLI, 2007). Ao ser submetido a elevadas temperaturas, o aço sofre uma alta redução de resistência e rigidez. Porém devido ao seu comportamento, a sua capacidade de suporte pode ser recuperada após o resfriamento se a temperatura máxima atingida for menor que 450°C para aços laminados a frio, e 600°C para aços laminados a quente (LIMA, E., 2017).

Durante um incêndio dificilmente o aço atingirá seu ponto de fusão, cerca de 1550°C (COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002). Apesar disso, outros danos na estrutura podem ocorrer. Souza (2010), diz que através dos lascamentos e fissuras em decorrência das elevadas temperaturas o escoamento do aço da armadura ocorre facilmente, fragilizando a estrutura, podendo levar o concreto ao colapso.

A solidariedade do conjunto aço-concreto é fundamental para o funcionamento do sistema estrutural. Khoury (2000) ressalta que ao ser submetido a elevadas temperaturas, a força de ligação entre esses dois componentes é reduzida, comprometendo o seu desempenho.

2.4 Alterações na estrutura do concreto em elevadas temperaturas

O concreto quando exposto a elevadas temperaturas pode sofrer alterações físicas e químicas na sua estrutura, quando combinadas, essas alterações proporcionam um dano significativo na capacidade resistente da estrutura (LIMA et al., 2004).

Os componentes do concreto - pasta de cimento Portland, agregados e aço – possuem coeficientes de dilatação diferentes, ao serem expostos a elevadas temperaturas a variação de dilatação proporciona o aumento da fissuração na matriz cimentícia (CUOGHI, 2006).

Durante o aquecimento a matriz cimentícia sofre expansões térmicas, a pasta retrai em função da evaporação da água, enquanto os agregados expandem, resultando na fissuração, principalmente na zona de transição, parte mais frágil da matriz (FERNANDES et al., 2017).

As fissuras devido a tensões térmicas podem ser agravadas pela pré-existência de microfissuras, estas funcionam como um caminho preferencial na formação das fissuras (LIMA, R., 2005). Lima, R. (2005) diz que acima de 500°C as fissuras tornam-se visíveis a olho nu, ocorrendo ainda um aumento na quantidade de fissuras.

Para um adequado conhecimento da capacidade resistente da estrutura é necessário a realização de análises em nível microestrutural, avaliando aspectos como as microfissuras e os lascamentos, que ocorrem quando o concreto está submetido ao alto grau de agressividade desse cenário (ALONSO et al. 2003 apud LIMA, R., 2005).

A microestrutura do concreto é considerada complexa, devido ao fato de não ser homogênea, ocorre diversas variações na pasta, podendo ser mais compacta ou mais porosa, dependendo da relação a/c (LIMA, R., 2005).

As alterações que ocorrem na microestrutura do concreto em elevadas temperaturas é resultado de transformações físico-químicas, como evaporação das águas presentes na composição, a dissociação do hidróxido de cálcio e descarbonatação dos agregados de calcários (LIMA, E., 2017).

Existe uma série de fatores que influenciam o comportamento do concreto que sofreu um aquecimento, tanto a pasta quanto o agregado são materiais que se decompõem com o calor, e deve ser levado em consideração, a permeabilidade, o tamanho do elemento, a taxa de crescimento de temperatura na influência da decomposição da estrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A pasta de cimento é extremamente vulnerável a ação da temperatura, como a pasta sofre diversas reações químicas, ocorre o aparecimento de fissuras e o aparecimento de movimentações térmicas, que prejudicam a durabilidade das estruturas.

2.4.1 Lascamento do concreto a elevadas temperaturas

O lascamento, também conhecido como “spalling” é um fenômeno onde ocorre o desprendimento do elemento de concreto inesperadamente de forma violenta ou não, quando os elementos estão expostos a elevadas temperaturas, a partir de um aquecimento rápido (KHOURY,2000).

Hertz (2003) enfatiza que o fenômeno pode danificar a seção transversal do elemento de concreto, reduzindo sua capacidade de carga, e por isso, deve ser considerado durante o projeto. A Figura 3 ilustra o dano causado na seção com exposição da armadura.

Figura 3 - Lascamento na estrutura.



Fonte: Lima et al. (2004).

O lascamento é considerado um fenômeno não muito bem compreendido, pois depende de vários fatores, como o tipo de agregados, as tensões térmicas, sendo o mais importante as tensões provocadas pelo vapor de água, que leva na maioria das vezes a um comportamento imprevisível (BUCHANAN, 2017).

A alta densidade do concreto é uma propriedade muito importante para o fenômeno, Anderberg et al. (1997) explica que uma estrutura compacta, ou seja, com pequena quantidade de poros, diminui a permeabilidade dos vapores de água, fazendo com que o lascamento ocorra através do acúmulo de tensões.

O lascamento pode ser dividido em quatro categorias, lascamento do agregado, lascamento explosivo, lascamento superficial e lascamento de quina, sendo que os três primeiros acontecem nos primeiros 30 minutos de aquecimento e o último entre 30 a 60 minutos (KHOURY, 2000).

O lascamento do agregado ocorre devido a sua expansão, onde partes dos agregados próximos a superfície desprendem e deixam pequenas crateras na superfície (HERTZ, 2003).

O lascamento superficial é o desprendimento de grandes camadas superficiais de concreto e no lascamento de quina há o desprendimento dos cantos vivos de elementos de concreto (HERTZ, 2003).

O lascamento explosivo ocorre de forma violenta e inesperada, havendo grande liberação de energia devido ao excesso de pressão nos poros em função do aumento de temperatura (SOUZA et al., 2012).

Existem meios de prevenir o lascamento ou a severidade dele, Buchanan (2017) afirma que o método mais barato é com a adição de fibras de polipropileno, as

quais conseguem através de suas propriedades em altas temperaturas, conduzir os vapores de água, diminuindo as tensões do elemento de concreto.

A adição de fibras de polipropileno em concretos é utilizada como meio de melhorar as suas características, como: aumentar a resistência, a ductilidade à compressão e diminuir a retração. (MEDEIROS, 2012).

Conhecendo os benefícios da utilização de fibras no concreto é importante conhecer o comportamento das mesmas em situação de incêndio, visto que a edificação atinge elevadas temperaturas neste cenário. Kitchen (2001) afirma que ao serem submetidas a elevadas temperaturas as fibras começam a derreter aos 160°C, à medida que o calor aumenta elas se degradam, diminuindo o volume inicial ocupado até restar a fuligem, que ocupa menos de 5% do volume inicial.

Os vazios deixados pelas fibras de polipropileno formam canais, que permitem que os vapores de água migrem até a superfície, diminuindo a pressão nos poros e consequentemente diminuindo o risco de lascamento explosivo (KALIFA; CHENE; GALLE, 2001). Souza (2010) afirma através de sua pesquisa que além de reduzir o lascamento, dependendo da quantidade de fibras adicionadas elas colaboram para diminuição da severidade do lascamento.

2.5 Concretos com materiais alternativos submetidos a elevadas temperaturas

Atualmente na construção civil, alguns pesquisadores têm voltado os seus trabalhos para a busca de materiais alternativos, como meio de reduzir o impacto ambiental ocasionados pela extração/e/ou produção de matérias primas utilizadas para a produção de concretos. Entre os diferentes produtos utilizados, está a areia de PET (Politereftalato de Etileno).

Alguns pesquisadores como Jardim (2017), Moura (2017) e Della Flora et al. (2018) apresentaram resultados satisfatórios quanto à propriedades mecânicas de concretos com esse novo material, principalmente para os teores de substituição da areia de PET de até 20%.

A areia de PET é produzida através do processo de trituração de garrafas PET, formando resíduo com dimensão máxima de 2,4 mm (ALMEIDA et al., 2004). Como o politereftalato de etileno é um polímero termoplástico, ele possui a capacidade de ser moldado repetidas vezes e formar fibras para uso industrial.

Meneses (2011) conclui através de sua pesquisa de concreto com adição de fibras de PET que a partir de 300°C, o PET já atingiu seu ponto de fusão e se transforma de sólido para líquido, a perda de volume gerada por essa transformação resulta na formação de uma rede de canais que permitem a saída do vapor, semelhante a fibra de polipropileno.

Silva (2013) em seus trabalhos com fibra de PET verificou que as fibras não impediram o lascamento de ocorrer em concreto com resistência inferior a 50 MPa, porém diminuíram a quantidade do lascamento e a força com o qual ocorreu.

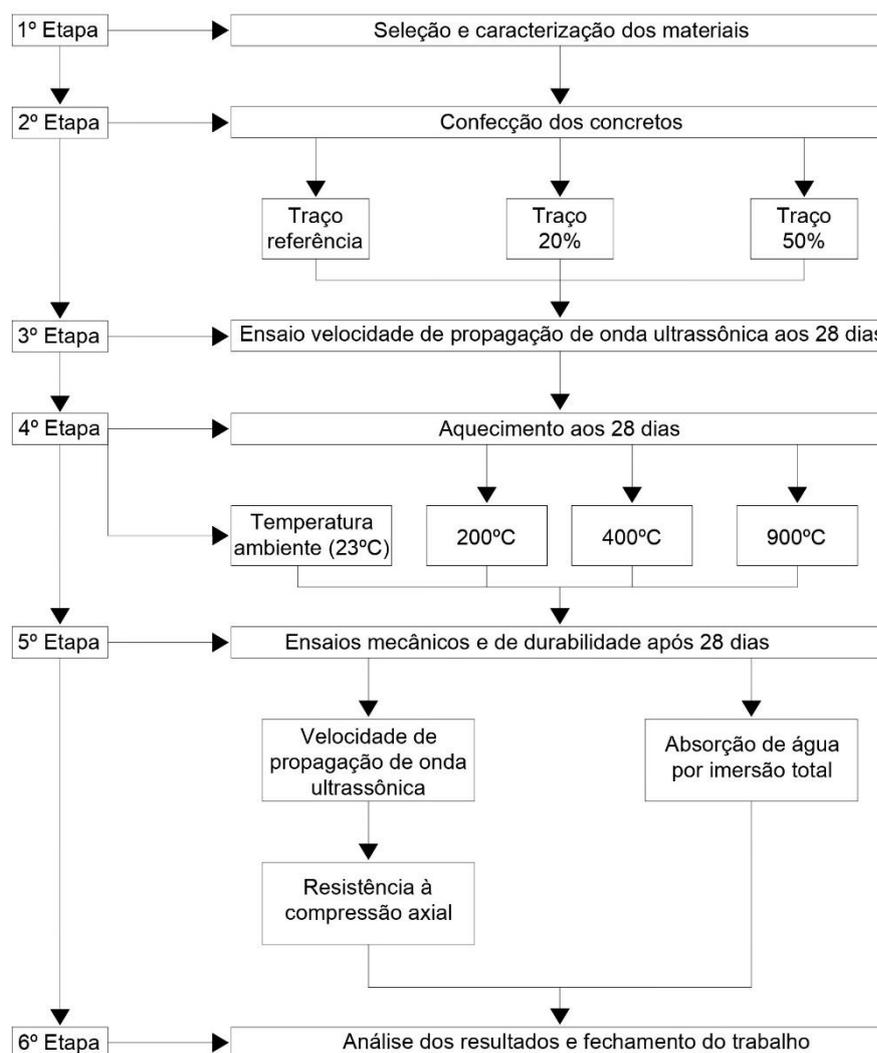
Sabendo que a fibra de PET possui um bom comportamento frente a exposição de altas temperaturas e que a areia de PET apresentou resultados satisfatórios de comportamento mecânicos esta pesquisa será desenvolvida com o objetivo de verificar o comportamento de concretos com areia de PET submetidos a elevadas temperaturas, com o intuito de verificar se a areia de PET apresenta um comportamento semelhante a fibras de polipropileno e fibras de PET quando submetidas a elevadas temperaturas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental dessa pesquisa é apresentado na Figura 4 e está dividido em seis etapas distintas. Na primeira e na segunda etapa serão apresentadas a caracterização dos materiais utilizados e a execução e cura dos concretos, respectivamente. Na terceira etapa será realizado o ensaio do ultrassom, na quarta etapa serão aquecidos os concretos a elevadas temperaturas, e na quinta etapa, serão executados os ensaios mecânicos e de durabilidade. A última etapa corresponderá a análise e discussão dos resultados.

Para a execução das etapas 1 a 5 serão utilizados os equipamentos e o espaço físico do Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete/RS.

Figura 4 - Esquema do Programa Experimental



3.1 Materiais

Neste tópico estão apresentadas as características dos materiais utilizados na confecção dos concretos de acordo com o programa experimental deste trabalho.

3.1.1 Cimento Portland

Para a confecção dos concretos foi utilizado como material aglomerante o cimento Portland CPIV-32, da marca Votorantim Cimentos. A caracterização físico-química e mecânica foi fornecida pelo fabricante, através da data e local de fabricação, sendo apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Exigências físicas, mecânicas e químicas do cimento Portland CPIV - 32

| Ensaio Químicos | | | |
|---------------------------------------|--------------------|------------|---------------|
| Ensaio | Unidade | Resultados | Exigências |
| Óxido de Magnésio - MgO | % | 5,6 | ≤6,5 |
| Trióxido de Enxofre - SO ₃ | % | 1,9 | ≤4,0 |
| Perda ao Fogo | % | 3,1 | ≤6,5 |
| Resíduo Insolúvel | % | 33,6 | Não aplicável |
| Ensaio Físicos | | | |
| Ensaio | Unidade | Resultados | Exigências |
| Expansibilidade à quente | mm | 0 | ≤5,0 mm |
| Início de Pega | min | 314,6 | ≥60 min |
| Fim de Pega | min | 382,1 | ≤600 min |
| Água de consistência normal | % | 31,6 | Não aplicável |
| Área específica (Blaine) | cm ² /g | 4334 | Não aplicável |
| Índice de finura - # 200 | % | 0,6 | ≥8,0 % |
| Índice de finura - # 325 | % | 2,4 | Não aplicável |
| Resistência à Compressão | | | |
| Ensaio | Unidade | Resultados | Exigências |
| Resistência à Compressão - 3 dias | MPa | 19,8 | ≥10 MPa |
| Resistência à Compressão - 7 dias | MPa | 24,3 | ≥20 MPa |
| Resistência à Compressão - 28 dias | MPa | 36,8 | ≥32 MPa |

Fonte: Dados fornecidos pela empresa Votorantim.

A determinação da massa específica do cimento Portland foi fornecida pela empresa Votorantim, tendo como resultado 2,81 g/cm³, cumprindo os requisitos especificados pela ficha de informações de segurança de produtos químicos da empresa.

3.1.2 Agregados miúdos

Os agregados miúdos utilizados foram a areia natural, proveniente do rio Ibicuí-RS e a areia de PET, proveniente da empresa de reciclagem PETCEU/ Paraná-PR, ambas apresentadas na Figura 5.

Figura 5 – Agregados miúdos



Fonte: Elaboração Própria

A caracterização do material foi realizada de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas brasileiras, listadas na sequência:

- NBR NM 27 (ABNT, 2001): Agregados – Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório.
- NBR NM 248 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica.
- NBR NM 45 (ABNT, 2006): Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.
- NBR NM 52 (ABNT, 2009): Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente.

A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam a caracterização da areia natural e da areia de PET, respectivamente.

Tabela 2 - Caracterização da areia natural

| Abertura das peneiras (mm) | % Retida | % Retida Acumulada |
|--|-----------------|---------------------------|
| 4,75 | 0,00 | 0,00 |
| 2,36 | 0,00 | 0,00 |
| 1,18 | 0,19 | 0,19 |
| 0,6 | 2,21 | 2,40 |
| 0,3 | 68,75 | 71,15 |
| 0,15 | 27,14 | 98,29 |
| Fundo | 1,71 | 100 |
| Total | 100 | - |
| Diâmetro máximo (mm) | | 0,60 |
| Módulo de Finura | | 1,72 |
| Massa específica (g/cm ³) | | 2,64 |
| Massa Unitária – Método A (g/cm ³) | | 1,66 |
| Massa Unitária – Método C (g/cm ³) | | 1,57 |

Fonte: Elaboração Própria

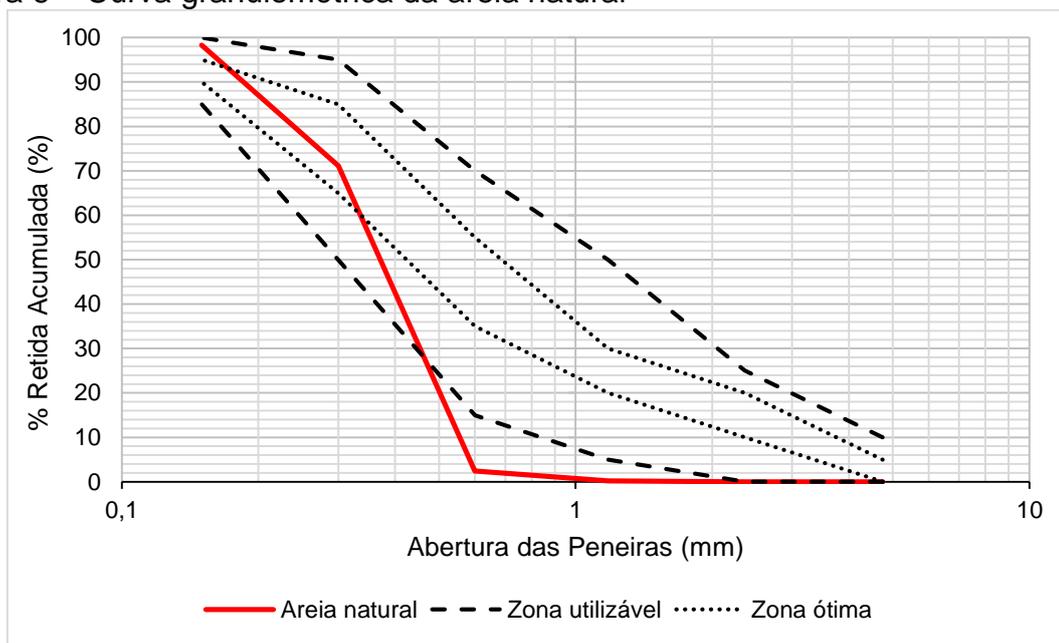
Tabela 3 - Caracterização da areia de PET

| Abertura das peneiras (mm) | % Retida | % Retida Acumulada |
|--|-----------------|---------------------------|
| 4,75 | 0,72 | 0,72 |
| 2,36 | 3,09 | 3,80 |
| 1,18 | 24,46 | 28,26 |
| 0,6 | 35,26 | 63,52 |
| 0,3 | 22,64 | 86,16 |
| 0,15 | 6,51 | 92,67 |
| Fundo | 7,33 | 100 |
| Total | 100 | - |
| Diâmetro máximo (mm) | | 2,36 |
| Módulo de Finura | | 2,75 |
| Massa Unitária – Método A (g/cm ³) | | 0,40 |
| Massa Unitária – Método C (g/cm ³) | | 0,33 |

Fonte: Elaboração Própria

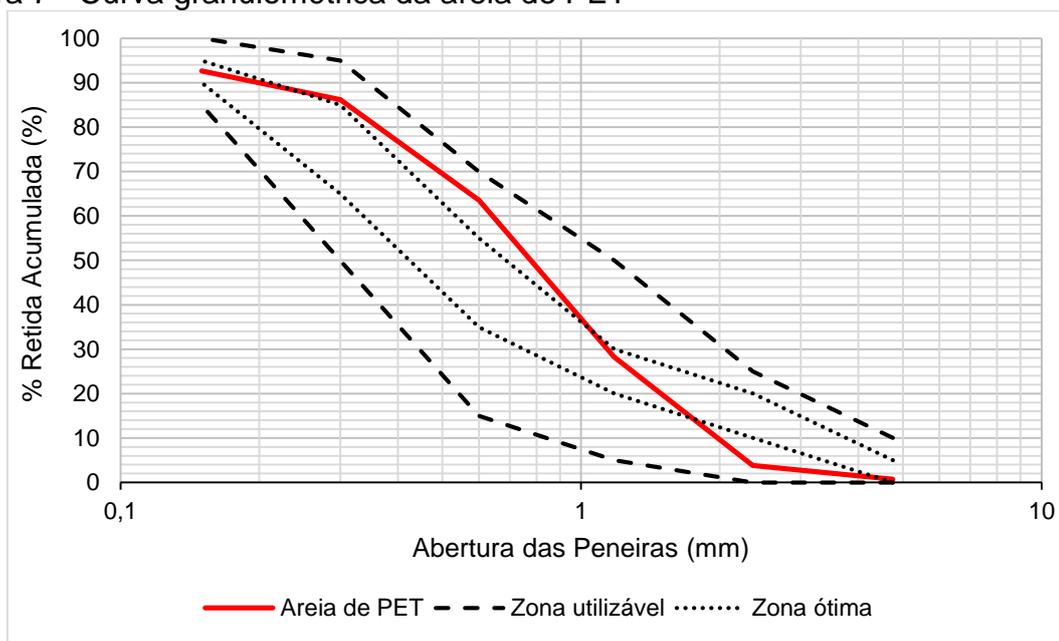
As Figuras 6 e 7 representam a curva granulométrica e os limites normativos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), da areia natural e da areia de PET, respectivamente.

Figura 6 – Curva granulométrica da areia natural



Fonte: Elaboração Própria

Figura 7 - Curva granulométrica da areia de PET



Fonte: Elaboração própria

A areia natural (Figura 6) ultrapassou os limites da zona utilizável estabelecido em norma nas peneiras 1,18 e 0,6mm. O agregado ensaiado apresentou um módulo de finura de 1,72, que de acordo com a Bauer (2008) caracteriza-se como uma areia fina por estar entre os limites de 1,71 e 2,85. Apesar de ter excedido parcialmente os limites da zona utilizável, o agregado foi utilizado na confecção dos concretos por ser o único disponível na região.

Na Figura 7 pode-se observar que a curva granulométrica da areia de PET encontra-se dentro da zona utilizável. Após a determinação do módulo de finura, de acordo com a classificação de Bauer (2008) a areia de PET é considerada uma areia média.

Visando avaliar a influência da substituição da areia natural pela areia de PET, foi realizada a composição granulométrica da mistura, sendo realizadas duas composições, uma com 20% e a outra com 50% de substituição de areia de PET, apresentadas na Figura 8. As Tabelas 4 e 5 apresentam o resultado da composição granulométrica das misturas.

Figura 8 – Composição das areias



Fonte: Elaboração Própria

Tabela 4 – Caracterização da composição com 20% de areia de PET

| Abertura das peneiras (mm) | % Retida | % Retida Acumulada |
|----------------------------|----------|--------------------|
| 4,75 | 0,10 | 0,10 |
| 2,36 | 1,36 | 1,46 |
| 1,18 | 3,99 | 5,45 |
| 0,6 | 8,88 | 14,33 |
| 0,3 | 65,70 | 80,03 |
| 0,15 | 18,68 | 98,70 |
| Fundo | 1,30 | 100 |
| Total | 100 | - |
| Diâmetro máximo (mm) | | 2,36 |
| Módulo de Finura | | 2,00 |

Fonte: Elaboração Própria

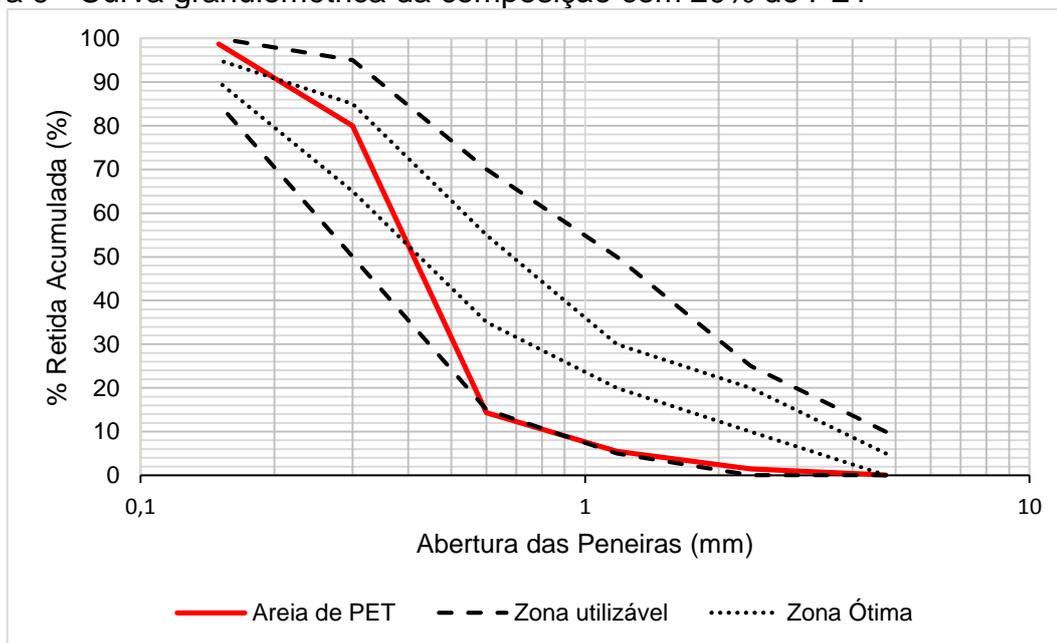
Tabela 5 - Caracterização da composição com 50% de areia de PET

| Abertura das peneiras (mm) | % Retida | % Retida Acumulada |
|----------------------------|----------|--------------------|
| 4,75 | 0,13 | 0,13 |
| 2,36 | 1,67 | 1,80 |
| 1,18 | 7,20 | 9,00 |
| 0,6 | 12,54 | 21,55 |
| 0,3 | 56,71 | 78,26 |
| 0,15 | 20,31 | 98,57 |
| Fundo | 1,43 | 100 |
| Total | 100 | - |
| Diâmetro máximo (mm) | | 2,36 |
| Módulo de Finura | | 2,09 |

Fonte: Elaboração Própria

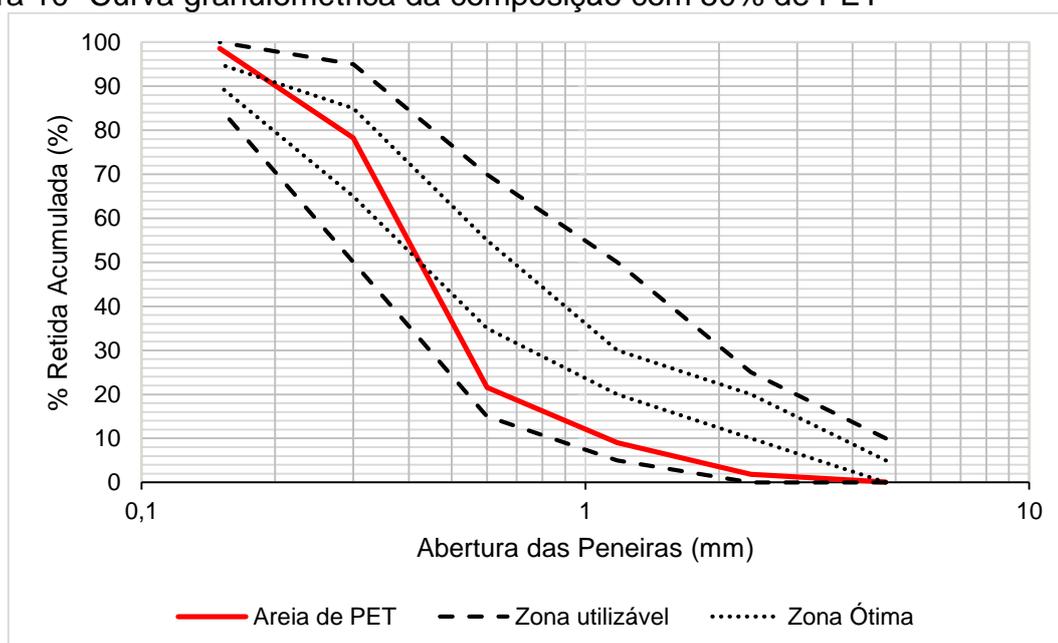
As Figuras 9 e 10 representam a curva granulométrica das duas composições, 20% e 50%, respectivamente.

Figura 9 - Curva granulométrica da composição com 20% de PET



Fonte: Elaboração Própria

Figura 10 -Curva granulométrica da composição com 50% de PET



Fonte: Elaboração Própria

Observando as figuras acima, pode-se observar que com a composição houve uma melhora na faixa 0,6 a 1,18 mm, a granulometria da areia natural, que antes não se enquadrava na zona utilizável, com a mistura de 20% (Figura 9) quase entra na zona utilizável inferior, enquanto na mistura de 50% (Figura 10) houve o enquadramento da curva dentro na zona utilizável.

A partir do módulo de finura das composições é possível caracterizar as composições como “areia fina”.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado no desenvolvimento deste trabalho é de origem basáltica, sendo proveniente da jazida da região de Alegrete-RS.

A caracterização do agregado graúdo seguiu as prescrições das normas listadas a seguir:

-NBR NM 27 (ABNT, 2001): Agregados – Redução da amostra de campo para ensaio de laboratório.

-NBR NM 248 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica.

-NBR NM 45 (ABNT, 2006): Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

-NBR NM 53 (ABNT, 2009): Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.

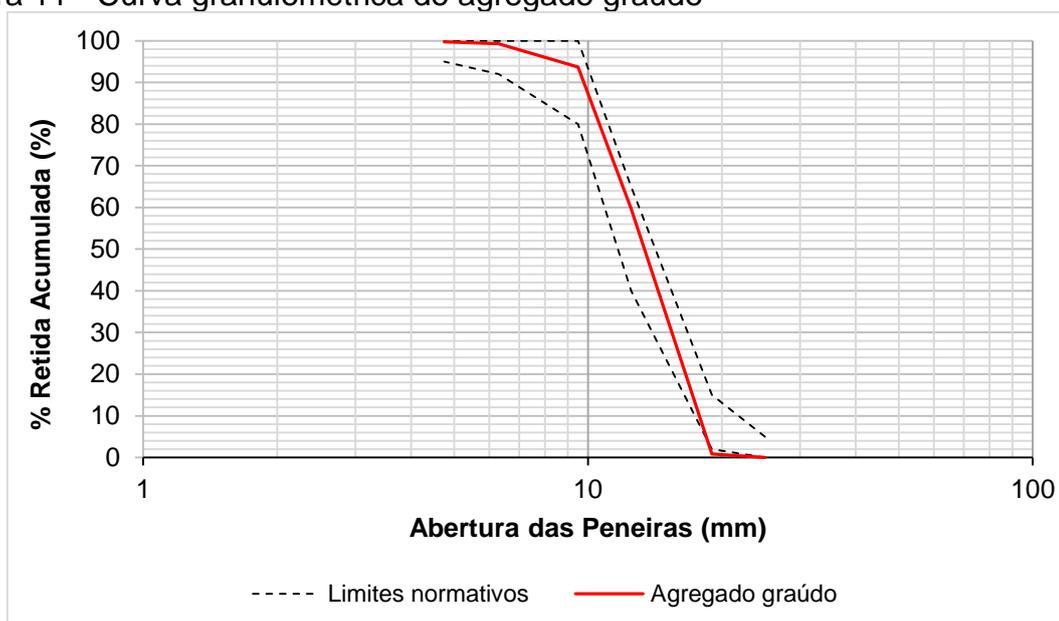
A caracterização do agregado graúdo granulométrica, é apresentada na Tabela 6 e a Figura 11 mostra a curva granulométrica e os limites normativos estabelecidos pela NBR 7211(ABNT, 2009).

Tabela 6 - Caracterização do agregado graúdo

| Abertura das peneiras (mm) | % Retida | % Retida Acumulada |
|--|----------|--------------------|
| 25 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 0,88 | 0,88 |
| 12,5 | 58,81 | 59,70 |
| 9,5 | 34,04 | 93,73 |
| 6,3 | 5,52 | 99,26 |
| 4,75 | 0,51 | 99,77 |
| 2,36 | 0,15 | 99,92 |
| 1,18 | 0,01 | 99,92 |
| 0,6 | 0,01 | 99,93 |
| 0,3 | 0,05 | 99,98 |
| 0,15 | 0,01 | 99,99 |
| Fundo | 0,1 | 100 |
| Total | 100 | - |
| Diâmetro máximo (mm) | | 19 |
| Módulo de Finura | | 6,94 |
| Massa específica (g/cm ³) | | 2,73 |
| Massa unitária – Método A (g/cm ³) | | 1,53 |
| Massa unitária – Método C (g/cm ³) | | 1,44 |

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 11 - Curva granulométrica do agregado graúdo



Fonte: Elaboração Própria.

A curva granulométrica do agregado graúdo (Figura 11) mostra que o material excedeu o limite na peneira 19 mm, enquanto o resto está dentro dos limites normativos estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009)

3.1.4 Água

A água utilizada para a confecção dos concretos é proveniente da rede pública de distribuição de água do município de Alegrete - RS, fornecida pela CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento, sendo isenta de material orgânico e impurezas.

3.1.5 Aditivo

Foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA CAST 585, a base de policarboxilatos, que fornece a manutenção do abatimento de cone. A opção por adicionar o aditivo químico se deu a fim de compensar a perda de trabalhabilidade ocasionada pela baixa relação água/cimento do traço ($a/c=0,45$), necessária para que os concretos de referência atingissem a condição de concreto estrutural (25 MPa na idade de 28 dias).

O teor de aditivo do traço de referência foi estabelecido em 0,065% para uma trabalhabilidade de 8 cm. Para os demais traços (20% e 50% de PET) foram mantidos o teor de aditivo e a relação a/c do traço de referência, com o objetivo de verificar a real influência da areia de PET na trabalhabilidade dos concretos no estado fresco e nas propriedades mecânicas dos concretos, no estado endurecido.

3.2 Procedimento de dosagem

Para o desenvolvimento do programa experimental foi estabelecido um traço de referência (com areia natural), para permitir a comparação deste com as misturas com substituição parcial do agregado miúdo por areia de PET.

O traço padrão (traço em massa) foi fixado em 1:4,5 (cimento: agregados), com a relação água/cimento de 0,45 e consumo de cimento de 410,50 kg/m³. A escolha do traço foi definida para que o concreto de referência atingisse o mínimo de 25 MPa de resistência à compressão axial aos 28 dias, valor mínimo de acordo com as normas brasileiras para o concreto ser considerado estrutural.

A substituição do agregado miúdo por areia de PET foi realizada em volume nos teores de 0%, 20% e 50%. Os teores de substituição foram escolhidos a partir de trabalhos realizados por pesquisadores como Jardim (2017) e Della Flora et al. (2018). Segundo os pesquisadores, até um teor de substituição em volume de 20%, a areia de PET não promove perda de desempenho mecânico dos concretos. Com base nessas informações, foi selecionado um teor de substituição baixo (20%) e um teor de substituição mais elevado (50%), objetivando observar as diferenças nas propriedades dos concretos submetidos a elevadas temperaturas.

Os traços e a nomenclatura utilizada para a identificação dos concretos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7- Traços utilizados para a produção dos concretos.

| Traço Unitário (em massa) | | | Cimento | Areia | Brita | a/c |
|---------------------------|--------------|------------|---------|------------|-------------|------|
| | | | 1 | 1,64 | 2,86 | 0,45 |
| Traços | Cimento (kg) | Areia (kg) | PET (l) | Brita (kg) | Aditivo (%) | a/c |
| REF | 24,48 | 40,13 | 0 | 70 | 0,06 | 0,45 |
| 20PET | 24,48 | 32,10 | 5,1 | 70 | 0,06 | 0,45 |
| 50PET | 24,48 | 20,07 | 12,75 | 70 | 0,06 | 0,45 |

REF - concreto de referência (sem areia de PET);

20PET - concreto com substituição em volume de 20% do agregado miúdo por areia de PET;

50PET - concreto com substituição em volume de 50% do agregado miúdo por areia de PET.

Fonte: Elaboração Própria.

3.2.1 Produção dos concretos

O preparo dos concretos foi executado em betoneira de eixo inclinado, conforme as prescrições da NBR 12655 (ABNT, 2015). O cimento, o agregado graúdo, o agregado miúdo natural e a água foram determinados em massa, enquanto que a areia de PET foi medida em volume, com dispositivo dosador, devido a sua massa específica baixa.

A mistura dos materiais ocorreu após a imprimação na betoneira, e na sequência foram adicionados o agregado graúdo, parte da água com aditivo químico, o cimento Portland, os agregados miúdos (areia natural e areia de PET) e por fim, o restante da água do traço.

Os adensamentos dos concretos foram executados manualmente para o traço referência e para o traço 20% de PET, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Para o traço 50% de PET o adensamento ocorreu com auxílio da mesa vibratória, em função

da baixa trabalhabilidade obtida, os corpos de prova poderiam não ficar bem adensados.

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e identificados (Figura 12), sendo mantidos em cura submersa, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015), até a idade de controle dos ensaios.

Figura 12 - Corpos de prova desmoldados



Fonte: Elaboração própria.

Para a realização dos ensaios previstos nos concretos endurecidos foram moldados corpos de prova cilíndricos nas dimensões de $\phi 10 \times 20\text{cm}$, nos quantitativos apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Quantitativo de corpos-de-prova (CPs) por tipo de ensaio

| Descrição do Ensaio | Idade de ensaio – 28 dias | |
|---|---------------------------|---------------------|
| | Nº de CPs por temperatura | Nº de CPs por traço |
| Resistência à compressão axial | 6 | 24 |
| Ensaio de propagação de onda - ultrassônica | | |
| Absorção de água por imersão total | 3 | 12 |

Fonte: Elaboração própria.

A trabalhabilidade do concreto no estado fresco foi determinada pelo ensaio de Abatimento do Tronco de Cone (Slump Test), conforme as recomendações da NM 67 (ABNT, 1998). O parâmetro de controle para a trabalhabilidade dos concretos foi estabelecido em $8 \pm 2 \text{ cm}$.

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para os diferentes teores de concreto confeccionados e a Figura 13 apresenta o registro fotográfico dos abatimentos do tronco cone para os três traços.

Tabela 9 – Trabalhabilidade dos traços

| Traço | Abatimento (cm) |
|--------------|------------------------|
| REF | 8 |
| 20PET | 10,5 |
| 50PET | 2,5 |

Fonte: Elaboração própria.

Figura 13 – Abatimentos do tronco cone dos traços estudados



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 13 mostra que o teor de 20% de substituição de areia de PET não promoveu alterações na trabalhabilidade do concreto no estado fresco. No entanto, quando o teor de areia de PET é aumentado para 50%, claramente observa-se uma perda de trabalhabilidade da mistura.

A Tabela 10 apresenta as temperaturas e umidades relativas do ar durante a moldagem dos traços estudados.

Tabela 10 – Temperaturas e umidades relativas do ar durante as moldagens.

| Traço | Temperatura (°C) | Umidade (%) |
|--------------|-------------------------|--------------------|
| REF | 20,7 | 62 |
| 20PET | 20,5 | 51 |
| 50PET | 24,2 | 67 |

Fonte: Elaboração própria.

3.2.2 Aquecimento dos concretos a diferentes temperaturas

Na idade de controle de 28 dias os corpos-de-prova foram submetidos ao aquecimento, realizado em um forno elétrico (Figura 14), da marca Sanchis, com potência de 15 kW, temperatura de alcance de 1250°C e capacidade de 120 litros.

Figura 14 - Forno elétrico Sanchis



Fonte: Elaboração própria

No período de 48h antes dos corpos de prova serem aquecidos, eles foram retirados da cura submersa, para que diminuísse o teor de umidade. Os corpos de prova foram então aquecidos até as temperaturas de estudo, 200°C, 400°C e 900°C. As temperaturas foram escolhidas com base na pesquisa de Lima, R. (2005), o qual realizou uma análise termo-diferencial em pastas de cimento, obtendo os valores de temperatura que se aproximam da mudança de fase, sendo possível analisar as mudanças que ocorrem na estrutura do concreto no decorrer do aquecimento.

Para o aquecimento dos corpos de prova, a taxa de aquecimento utilizada foi de 1°C/min para cada corpo de prova, adotada seguindo as recomendações da RILEM TC129 MHT (2000), as quais se baseiam na superfície diametral do corpo de prova. Como foram aquecidos 9 corpos de prova juntos, para cada uma das temperaturas estudadas, a taxa de aquecimento utilizada foi de 9°C/min.

Após atingir a temperatura desejada, a mesma foi mantida por 30 minutos, o tempo mínimo em que se espera que a estrutura resista ao fogo de acordo com a NBR 14432 (ABNT, 2001). Ao terminar o tempo, os corpos de prova foram resfriados em ambiente de laboratório até atingirem a temperatura ambiente, para posteriormente serem ensaiados.

A Tabela 11 apresenta o tempo em que os corpos de prova foram expostos a temperatura de aquecimento.

Tabela 11 – Tempo de permanência na mufla.

| Temperatura (°C) | Tempo de rampa (min) | Tempo de permanência (min) |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| 200 | 23 | 30 |
| 400 | 45 | 30 |
| 900 | 100 | 30 |

Fonte: Elaboração própria

3.3 Propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos no estado endurecido

Nesta seção, nos itens 3.3.1 ao 3.3.4 apresenta os ensaios de controle dos concretos no estado endurecido.

3.3.1 Ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Os ensaios de propagação de onda ultrassônica nos concretos foram executados aos 28 dias, após o encerramento do processo de cura. Na sequência, os concretos foram submetidos ao processo de aquecimento nas temperaturas estudadas e, após essa etapa, novamente foram realizados o ensaio de propagação de onda ultrassônica.

A norma NBR 8802 (ABNT, 2019) – que forneceu o embasamento para a realização desse ensaio - prescreve a utilização de equipamentos com transdutores acima de 20KHz, com diâmetro de 50mm (Figura 15). O ensaio determinou a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas através de elementos de concreto, e compara com um índice de qualidade previamente definido, permitindo verificar a homogeneidade do concreto mostrando possíveis falhas internas e os danos provocados pelas elevadas temperaturas a qual o corpo de prova foi submetido.

Figura 15 - Equipamento de propagação de onda ultrassônica



Fonte: Elaboração Própria

3.3.2 Resistência à compressão axial

Na idade especificada (28 dias), as amostras tiveram suas bases retificadas, conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). A retificação garantiu a planicidade das amostras permitindo que o carregamento fosse aplicado uniformemente sobre a superfície.

O ensaio para a determinação da resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos seguiu as prescrições da NBR 5739 (ABNT 2007). O ensaio foi executado após os concretos serem submetidos ao processo de aquecimento e ao ensaio de propagação de onda ultrassônica.

3.3.3 Absorção de água por imersão total

O ensaio para determinação da absorção de água por imersão total em concretos endurecidos seguiu as prescrições da NBR 9778 (ABNT, 2009). Na idade de 28 dias os corpos de prova após o aquecimento permaneceram 72 horas em estufa para estabilização de suas massas, após essa etapa foi realizado a saturação destes em água à 23°C por 72 horas e por último foram colocados em recipiente com água que teve sua temperatura elevada progressivamente até a ebulição por 5 horas, após o resfriamento dos corpos de prova foi possível realizar as últimas pesagens.

O conhecimento da absorção de água determinou o quão poroso o concreto se tornou, sendo fundamental para a análise do comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados referente ao comportamento dos concretos, referência e com substituição de areia de PET, após serem submetidos ao aquecimento. O item 4.1 apresenta o resultado da massa específica no estado fresco e endurecido, nos itens 4.2 a 4.4 apresentam os resultados dos ensaios realizados no estado endurecido e no item 4.5 os aspectos visuais observados nos concretos. Os resultados apresentados se referem aos dados médios, os resultados individuais de cada corpo de prova está apresentado nos apêndices.

4.1 Massa específica do concreto

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos da massa específica dos concretos no estado fresco dos traços estudados, sendo obtidos pela média de dois corpos de prova.

Tabela 12 – Massa específica dos concretos no estado fresco

| Traço | Massa específica do concreto fresco (kg/m³) |
|--------------|---|
| REF | 2432,14 |
| 20PET | 2365,04 |
| 50PET | 2302,04 |

Fonte: Elaboração própria

Os resultados evidenciaram a redução da massa específica dos concretos com o aumento do teor de areia de PET, sendo uma diminuição de 2,76% no teor de 20% de PET e 5,35% no teor de 50% de PET, em relação ao traço referência. Pode-se concluir que a redução da massa específica dos concretos está relacionada com o aumento do teor de areia de PET, já que a areia de PET possui massa específica menor que a areia natural.

A massa específica da amostra seca foi determinada com base na NBR 9778 (ABNT, 2009), sendo analisado o comportamento dos traços em função da temperatura de aquecimento, conforme a Tabela 13.

Tabela 13 – Massa específica seca

| Traço | Massa específica seca (kg/m ³) | | | |
|-------|--|-------|-------|-------|
| | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C |
| REF | 2320 | 2312 | 2323 | 2218 |
| 20PET | 2231 | 2187 | 2225 | 2153 |
| 50PET | 2143 | 2141 | 2139 | 2009 |

Fonte: Elaboração própria

Durante o aquecimento de cada traço não houve mudanças significativas no seu valor até os 400°C, aos 900°C houve uma pequena diminuição, Costa (2008) atribuí essa redução a evaporação da água.

Em relação aos teores analisados, no estado endurecido percebe que o aumento da substituição da areia natural por areia de PET fez que com que a massa específica diminuísse, mantendo a mesma tendência já observada para essa propriedade no estado fresco.

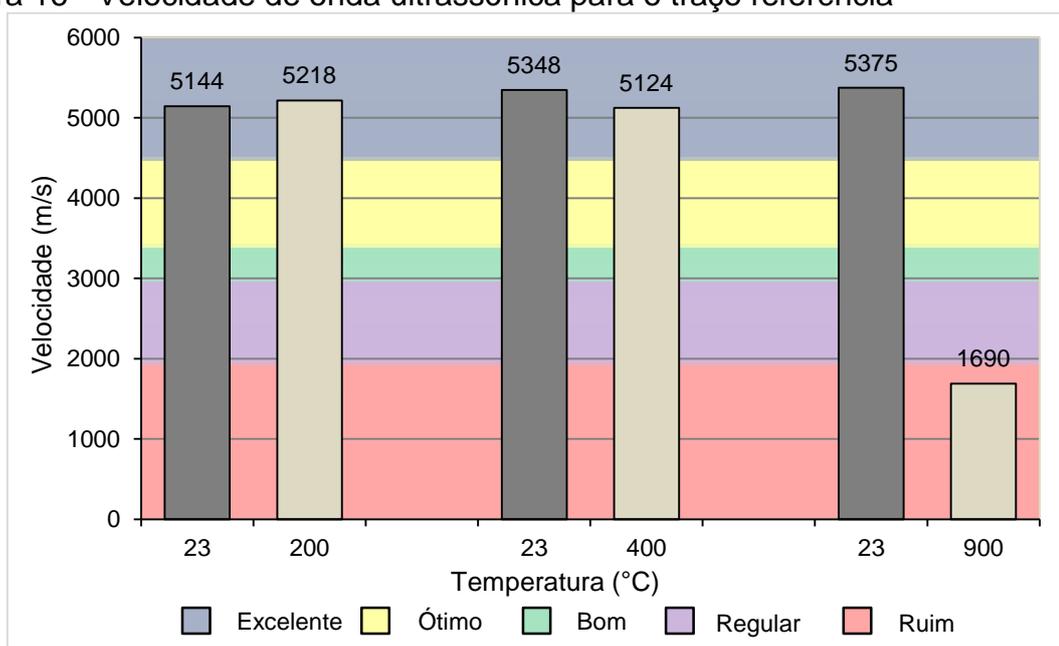
4.2 Ensaios de velocidade de propagação de onda ultrassônica

Os resultados de velocidade de propagação de onda ultrassônica foram comparados com a classificação de Whitehurst (1966) e Rincón et al (1998), os quais relacionaram a velocidade de propagação de onda ultrassônica a qualidade do concreto, classificando como “excelente” quando acima de 4500 m/s, “ótimo” de 3500 a 4500 m/s, “bom” de 3000 a 3500 m/s, “regular” de 2000 a 3000 m/s e “ruim” abaixo de 2000 m/s.

A velocidade da onda ultrassônica dos traços obtida antes e após os concretos serem submetidos as temperaturas de estudo (200°C, 400°C e 900°C) estão apresentadas nas Figuras 16, 18 e 19.

Os gráficos (Figuras 16, 18 e 19) mostram que os traços estudados apresentaram uma tendência de decréscimo da resistência à compressão axial com a variação da temperatura de aquecimento. Na temperatura ambiente (23°C), todos os traços apresentaram uma classificação de concreto “excelente”. Visualmente observou-se que todos os concretos investigados mantiveram a sua integridade física até os 400°C.

Figura 16 - Velocidade de onda ultrassônica para o traço referência



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 16 mostra que para as variações da temperatura de 200°C e 400°C a que os concretos de referência foram submetidos não promoveram alterações expressivas na propagação da onda ultrassônica. Para os concretos submetidos a essas temperaturas, os concretos foram classificados como “excelentes”.

Para a temperatura de 900°C, a velocidade de propagação da onda. A redução da velocidade já era esperada, o aspecto visual dos concretos submetidos a 900°C já apresentarem fissuras na face externa dos corpos de prova (Figura 17).

Figura 17 - Fissuras na superfície do traço referência após a exposição a 900°C



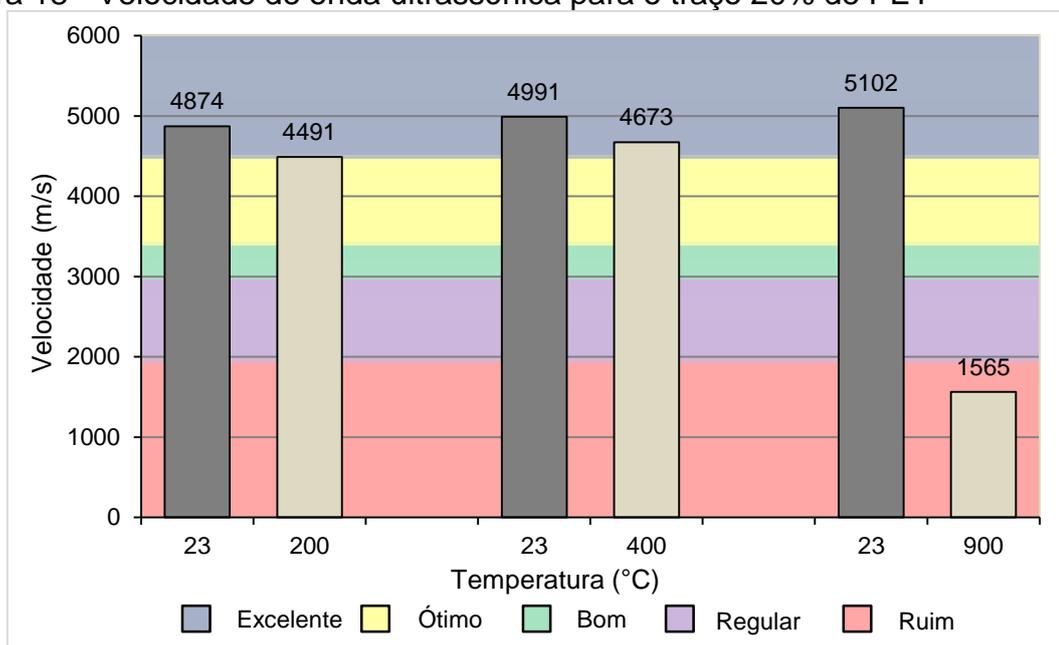
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 18 mostra o comportamento do concreto com substituição de 20%, na temperatura ambiente (23°C) apresentaram a classificação “excelente”. Nas

temperaturas de 200°C e 400°C houve um pequeno decréscimo da velocidade, enquanto na temperatura de 900°C a velocidade das ondas ultrassônicas decresceram 70% em relação aos concretos a temperatura ambiente, podendo ser classificado como um concreto “ruim”.

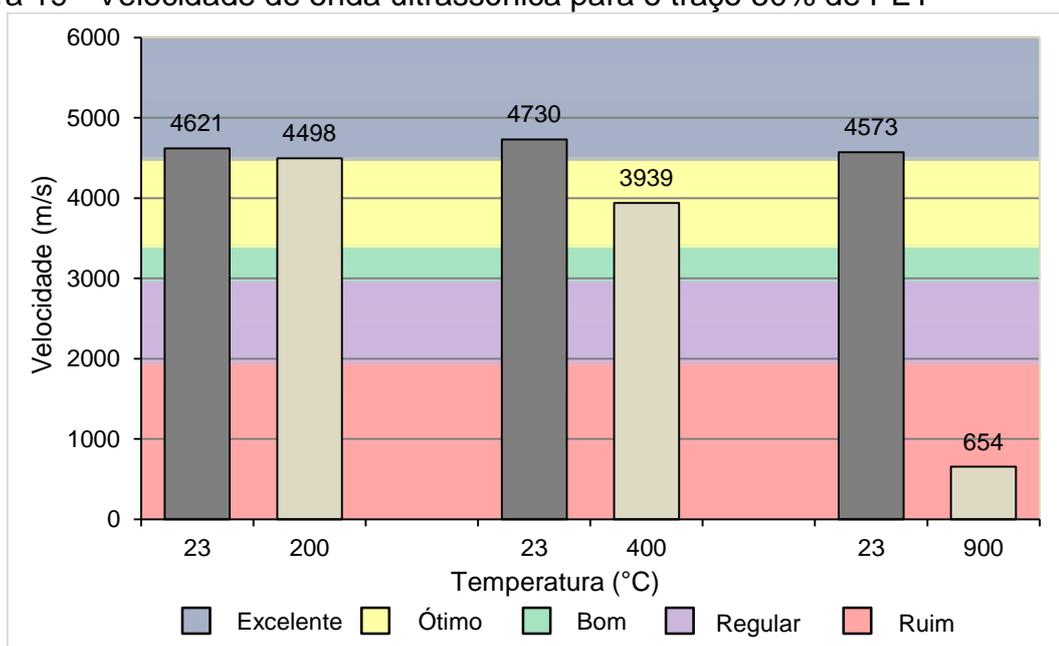
Acredita-se que o derretimento da areia de PET no interior do concreto contribui para a formação de falhas internas, as quais estão diretamente ligadas a diminuição da velocidade de propagação das ondas ultrassônicas.

Figura 18 - Velocidade de onda ultrassônica para o traço 20% de PET



Fonte: Elaboração própria.

Figura 19 - Velocidade de onda ultrassônica para o traço 50% de PET

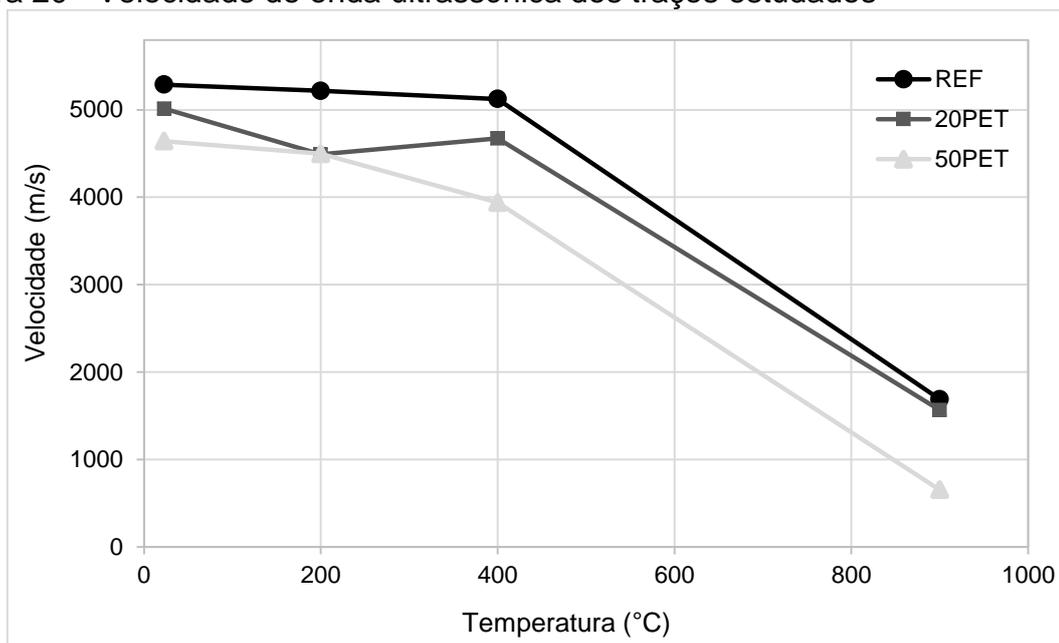


Fonte: Elaboração própria.

A Figura 19 mostra que os concretos em temperatura ambiente (23°C) apresentaram classificação “excelente”. Após os 400°C houve um decréscimo acentuado da velocidade da onda ultrassônica dos concretos investigados. Para os concretos submetidos às temperaturas de 400°C e 900°C, a redução da velocidade de propagação da onda ultrassônica foram de aproximadamente 17% e 86%, respectivamente. Os concretos submetidos a temperaturas de 200°C e 400°C foram classificados como “ótimos” e os concretos submetidos à temperatura de 900°C como “ruins”.

A Figura 20 apresenta um comparativo da velocidade da onda ultrassônica entre os três traços estudados.

Figura 20 - Velocidade de onda ultrassônica dos traços estudados



Fonte: Elaboração própria.

O gráfico (Figura 20) indica que o aumento do teor de substituição de PET nas misturas implicou na redução da velocidade da onda ultrassônica dos concretos para todas as temperaturas de controle, Silva e De Sampaio Bonfim (2019) em seu trabalho com fibras de polipropileno, observaram o mesmo resultado e atribuíram a baixa densidade do material, como o PET também possui baixa densidade a mesma justificativa pode ser atribuída. Observa-se que o concreto de referência apresentou o melhor desempenho entre as misturas investigadas, e o traço com 50% de areia de PET, o pior desempenho.

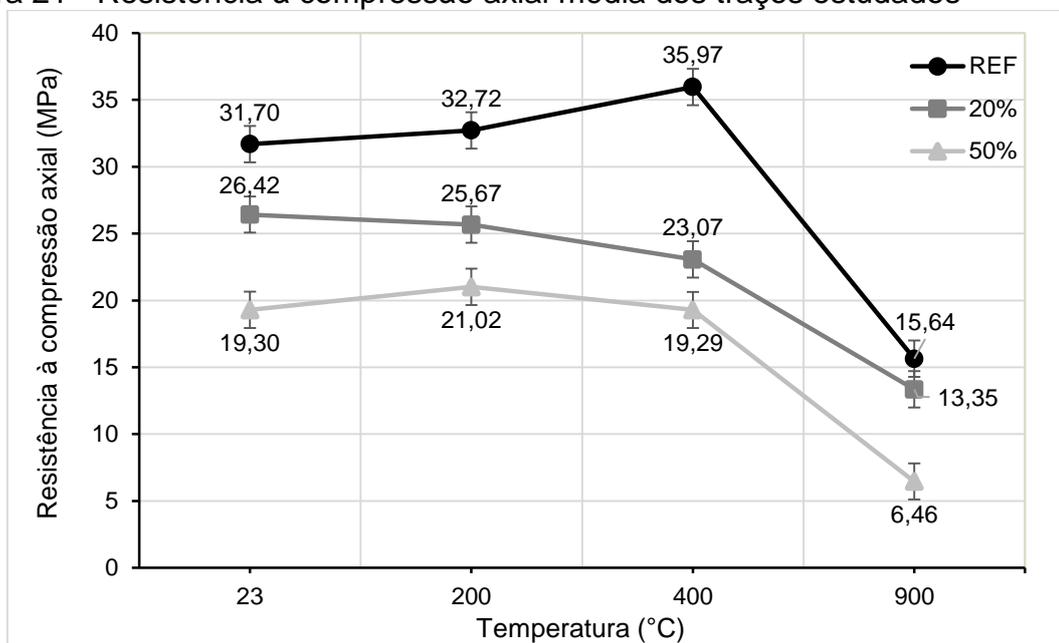
Verifica-se que a partir da temperatura de 400°C ocorre uma variação acentuada da velocidade de propagação da onda ultrassônica em todas as misturas, Dos Santos Silva et al (2018) atribui esse comportamento ao comprometimento da estrutura pois na temperatura de 900°C o grau de fissuração é muito elevado.

4.3 Resistência à compressão axial

A resistência à compressão do concreto é a propriedade mais importante em termos de análise estrutural após o contato com elevadas temperaturas. A Figura 21 apresenta os valores obtidos de resistência à compressão axial na idade de 28 dias para os traços de referência, com substituição de 20% de PET e com substituição de

50% de PET, em temperatura ambiente (23°C) e em relação as temperaturas de aquecimento (200°C, 400°C e 900°C) aos quais os concretos foram submetidos.

Figura 21 - Resistência à compressão axial média dos traços estudados



Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se no gráfico que o traço referência apresentou os melhores resultados de resistência à compressão axial entre os traços investigados, ou seja, a variação do teor de PET nas misturas implicou na diminuição da resistência à compressão axial, corroborando com alguns trabalhos científicos (Moura (2017), Fernandes (2017)). Apesar da diminuição da resistência à compressão axial de 17% do traço de 20% de PET para o traço referência, ele atingiu a resistência estipulada inicialmente de 25 MPa.

O gráfico analisado (Figura 21) demonstrou uma tendência de redução da resistência à compressão axial com a elevação da temperatura, sendo intensificada a partir de 400°C. Observa-se que o concreto referência apresentou um pequeno ganho de resistência ao ser aquecido até 400°C e o concreto com substituição de 50% de PET apresentou ganho na temperatura de 200°C, quando comparados com a resistência em temperatura ambiente. Esse comportamento já tinha sido verificado em outros programas experimentais (Lima, R. (2005), Silva (2013), Khoury (2000)), e foi atribuído a um processo tardio de hidratação do cimento que foi estimulado pela temperatura de aquecimento. Neville (1997) salienta também que a idade dos

concretos influenciou nesse resultado, já que os concretos não tiveram tempo para completar suas reações químicas.

A resistência à compressão axial dos concretos com a variação da temperatura de 400°C para 900°C apresentou redução de 56% no traço referência, redução de 42% no traço 20% de PET, e redução de 66% no traço 50% de PET. Essa queda de resistência dos concretos pode ser atribuída a alguns fatores. Segundo Cánovas (1988) após os 400°C, o C-S-H já sofreu total desidratação, começando a se decompor em óxido de cálcio e água, o que acaba resultando na diminuição da resistência e no aparecimento de fissuras.

Meneses (2011) relata que o PET presente nos concretos nos 400°C, passa a perder sua massa, resultando no aumento de vazios dentro do concreto, o que influencia a redução da resistência. Como pode ser observado o traço com 50% de PET obteve a menor resistência aos 900°C, sendo esse fator atribuído ao aumento de vazios na sua estrutura.

Para a verificação de que as variáveis independentes dessa pesquisa (Teor de PET e Temperatura) apresentaram influência significativa na variável de resposta (resistência à compressão axial), os resultados passaram por uma análise de variância (ANOVA), apresentados na Tabela 14.

A análise de variância (ANOVA) avalia os dados verificando se existe diferença significativa entre as médias e se as variáveis independentes exercem real influência em alguma variável dependente. Os valores são estatisticamente significativos quando o resultado de “p” é menor que 0,05, podendo chegar a 95% de confiança nos dados.

Tabela 14 - Análise ANOVA da resistência à compressão axial

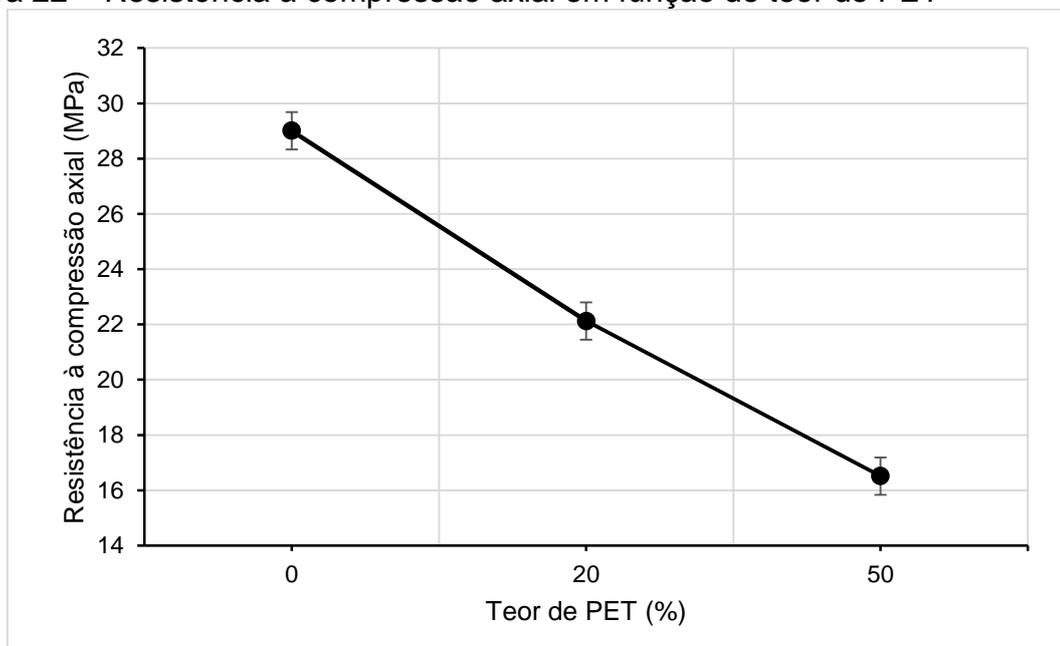
| ANOVA | SQ | GL | MQ | Teste F | p |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------|
| Intercessão | 36606,32 | 1 | 36606,32 | 13262,15 | 0,000000 |
| Teor PET | 1878,32 | 2 | 939,16 | 340,25 | 0,000000 |
| Temperatura | 2768,51 | 3 | 922,84 | 334,34 | 0,000000 |
| Teor PET x Temperatura | 194,34 | 6 | 32,39 | 11,73 | 0,000000 |
| Erro | 165,61 | 60 | 2,76 | | |

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 14 mostra que as variáveis independentes (Teor de PET e Temperatura) são significativas isoladamente ($p < 0,05$), ou seja, influenciaram na variável de resposta (Resistência à compressão axial). A interação dos fatores Teor de PET x Temperatura também foi significativa.

As Figuras 22 e 23 mostram os resultados de resistência à compressão axial em função das variáveis independentes (Teor de PET e Temperatura), obtidos a partir da análise ANOVA.

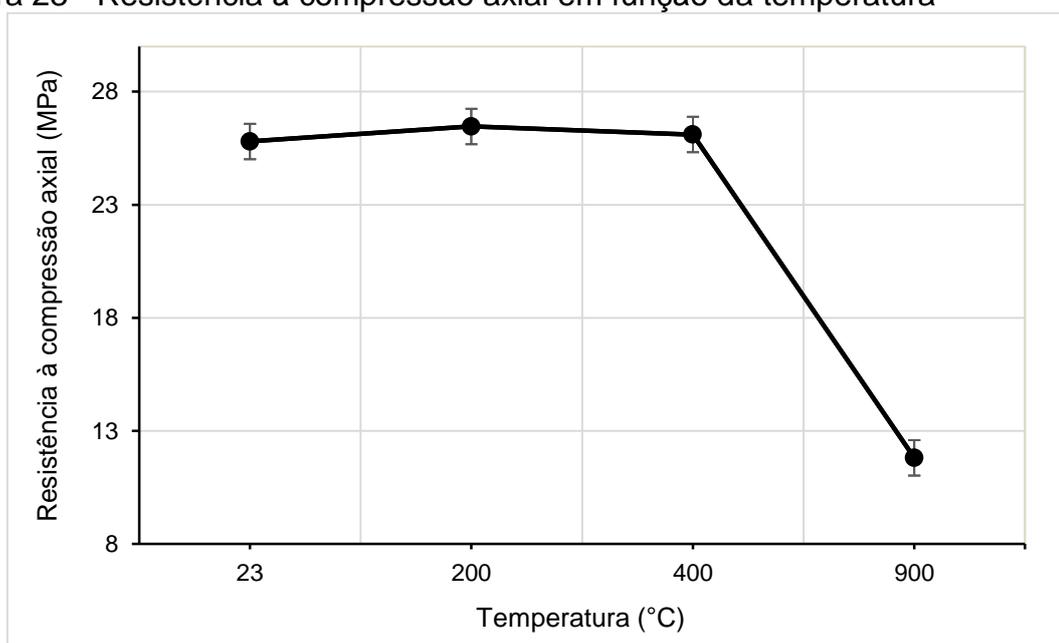
Figura 22 – Resistência à compressão axial em função do teor de PET



Fonte: Elaboração própria.

Através da análise ANOVA (Tabela 14 e Figuras 22) observa-se que à medida que o teor de PET é aumentado nas misturas, ocorre uma redução da resistência à compressão axial dos concretos.

Figura 23 - Resistência à compressão axial em função da temperatura



Fonte: Elaboração própria

A análise ANOVA indicou uma diminuição da resistência à compressão axial com o aumento da temperatura de aquecimento dos concretos, sendo essa variação mais expressiva a partir da temperatura de 400°C (Figura 23).

A Figura 23 mostra que até a temperatura de 400°C parece não haver grandes variações na resistência à compressão axial dos concretos. Em função dessa observação foi gerada uma nova análise de variância (ANOVA) considerando apenas os resultados até 400°C. Os resultados dessa nova análise de variância (ANOVA) são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Análise ANOVA da resistência à compressão axial até 400°C

| ANOVA | SQ | GL | MQ | Teste F | p |
|--------------|-----------|-----------|-----------|----------------|----------|
| Intercessão | 36857,93 | 1 | 36857,93 | 6962,574 | 0,000000 |
| Teor PET | 1694,16 | 2 | 847,08 | 160,016 | 0,000000 |
| Temperatura | 3,96 | 2 | 1,98 | 0,374 | 0,689765 |
| Erro | 259,39 | 49 | 5,29 | | |

Fonte: Elaboração própria.

Os dados da ANOVA (Tabela 15) indicaram que o aquecimento dos concretos até a temperatura de 400°C não promoveram influência nos resultados de resistência à compressão axial dos concretos. Esses resultados corroboram com os resultados de Lima, R. (2005), que concluiu que medidas de proteção ativa ou passivas que impeçam o concreto de ultrapassar a temperatura de 400°C, são alternativas técnicas

para que a estrutura de concreto não sofra danos consideráveis ao ser afetado por um incêndio.

O teste de Duncan (Tabela 16), geralmente executado após a análise de ANOVA, foi realizado a fim de identificar quais os pares de média que diferiam estatisticamente entre si. A tabela original de Duncan contendo os valores de significância está apresentada nos apêndices.

Tabela 16 - Teste de Duncan

| | Teor PET | Aquecimento | {1} | {2} | {3} | {4} | {5} | {6} | {7} | {8} | {9} | {10} | {11} | {12} |
|------|----------|-------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|------|
| | | | 31,695 | 32,17 | 35,97 | 15,64 | 26,42 | 25,67 | 23,068 | 13,34 | 19,29 | 21,01 | 19,29 | 6,46 |
| {1} | 0 | 23 | | NS | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| {2} | 0 | 200 | NS | | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| {3} | 0 | 400 | S | S | | S | S | S | S | S | S | S | S | S |
| {4} | 0 | 900 | S | S | S | | S | S | S | S | S | S | S | S |
| {5} | 20 | 23 | S | S | S | S | | NS | S | S | S | S | S | S |
| {6} | 20 | 200 | S | S | S | S | NS | | S | S | S | S | S | S |
| {7} | 20 | 400 | S | S | S | S | S | S | | S | S | S | S | S |
| {8} | 20 | 900 | S | S | S | S | S | S | S | | S | S | S | S |
| {9} | 50 | 23 | S | S | S | S | S | S | S | S | | NS | NS | S |
| {10} | 50 | 200 | S | S | S | S | S | S | S | S | NS | | NS | S |
| {11} | 50 | 400 | S | S | S | S | S | S | S | S | NS | NS | | S |
| {12} | 50 | 900 | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | S | |

Legenda : NS - Não Significativo S - Significativo

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados (Tabela 16) mostraram que para todos os traços investigados - a variação da temperatura de 23°C → 200°C não promoveu mudanças significativas na resistência à compressão axial dos concretos. As pesquisas de Lima, R (2005), Silva (2013) e Wendt (2006), também observaram essa mesma tendência de comportamento.

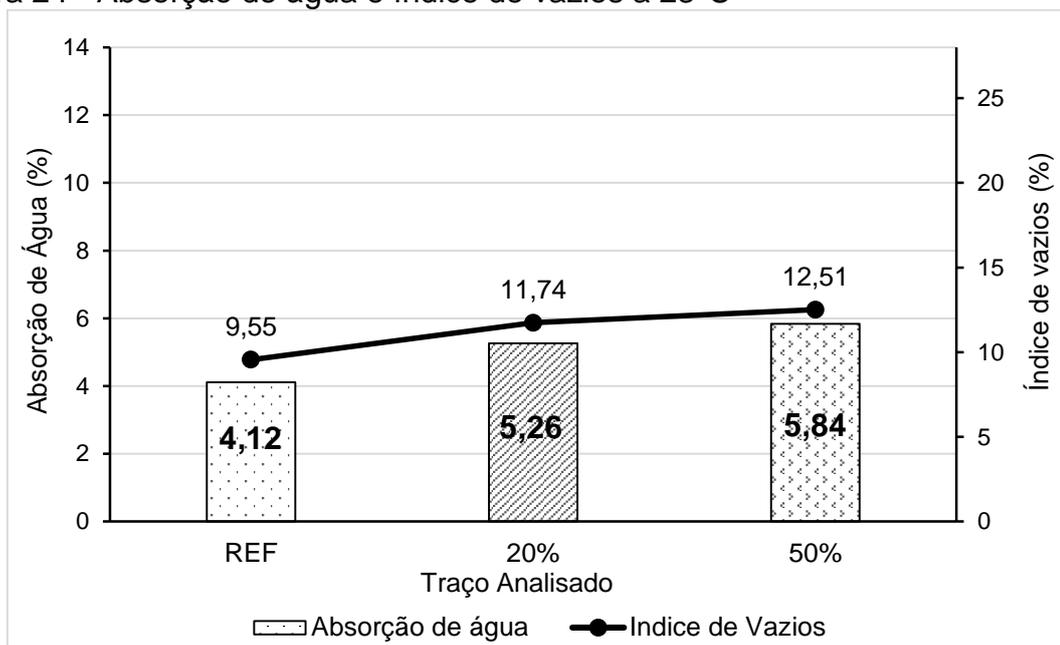
Para o traço com 50% de PET, a variação da temperatura de 23°C → 400°C e de 200°C → 400°C também não promoveram alterações significativas na resistência à compressão axial dos concretos investigados .

Para os demais traços, a variação da temperatura influenciou de maneira significativa na variável de resposta (Resistência à compressão dos concretos).

4.4 Absorção de água por imersão total

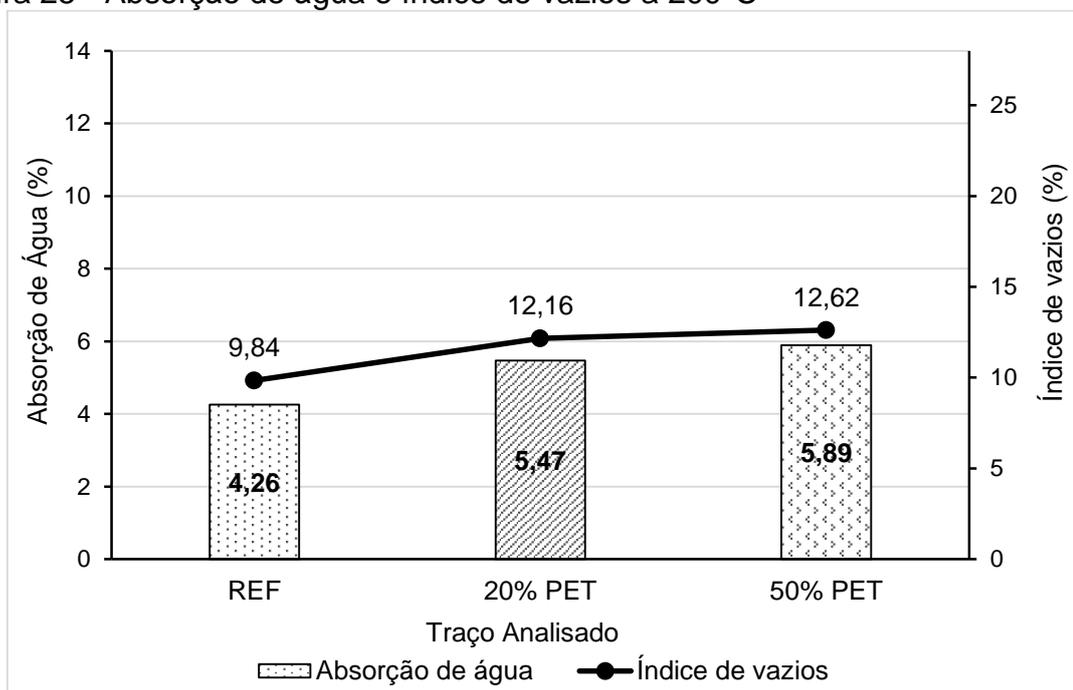
As Figuras 24, 25, 26 e 27 apresentam os resultados da absorção de água por imersão total e índice de vazios dos traços estudados, sendo divididos por cada temperatura de estudo.

Figura 24 - Absorção de água e índice de vazios a 23°C



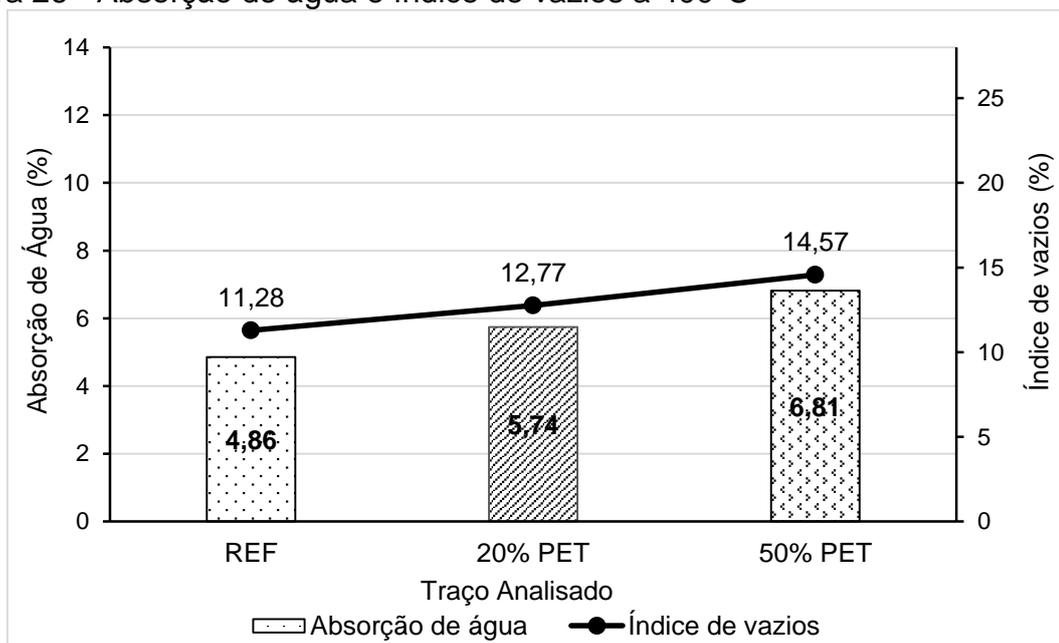
Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 - Absorção de água e índice de vazios a 200°C



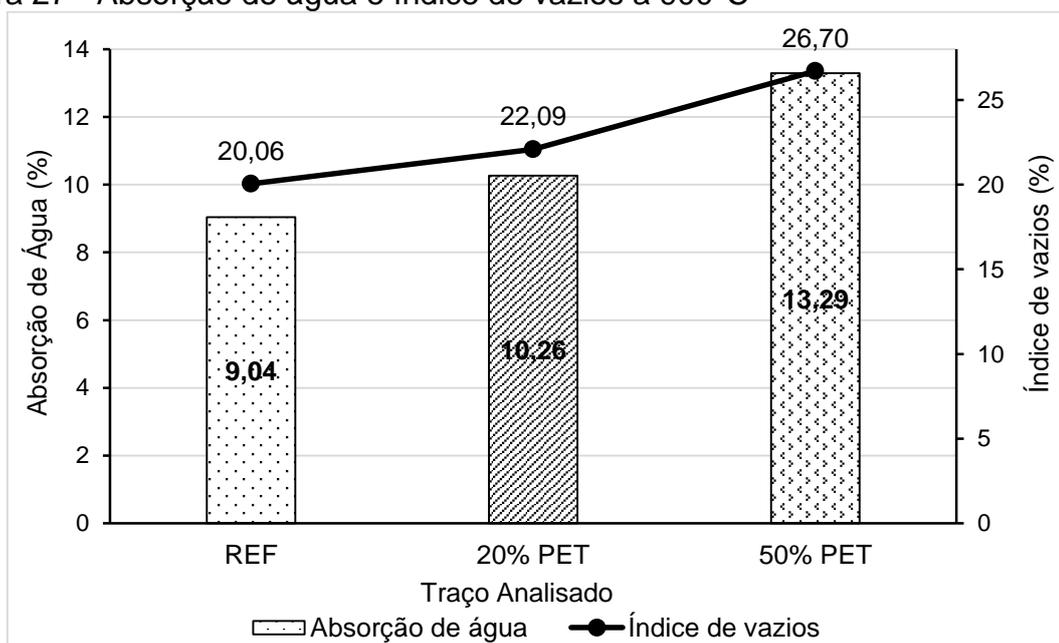
Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 - Absorção de água e índice de vazios a 400°C



Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 - Absorção de água e índice de vazios a 900°C



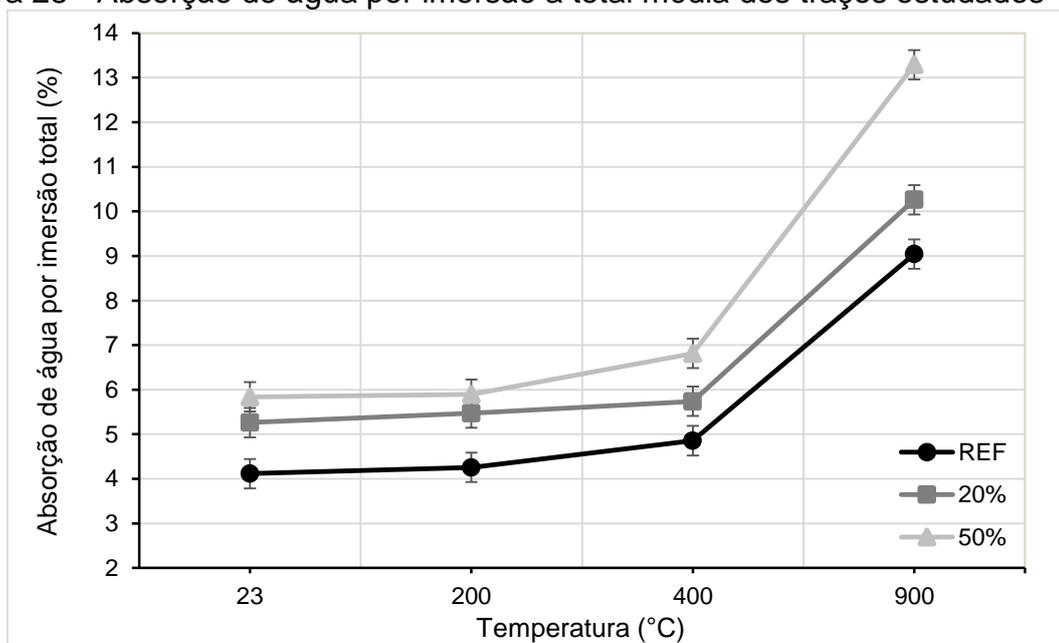
Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que em todas as temperaturas de controle (Figura 24 a 27) o teor de PET influenciou no aumento na absorção de água e conseqüentemente no índice de vazios em relação ao traço referência. Canellas (2005) atribui o aumento da absorção de água às características hidrofóbicas do PET, que faz com que a água absorvida pela matriz cimentícia exceda a quantidade necessária para a hidratação,

ocasionando um aumento de fissuras na zona de transição, que eleva a porosidade do concreto.

A Figura 28 faz um comparativo entre a absorção de água nos traços estudados e as temperaturas em que os concretos foram submetidos.

Figura 28 - Absorção de água por imersão a total média dos traços estudados



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 28 mostra uma tendência de elevação da absorção de água com a variação da temperatura de aquecimento dos concretos, sendo observado um pico de crescimento mais expressivo entre 400°C a 900°C. Como relatado anteriormente, o derretimento do PET e a degradação dos componentes na matriz cimentícia contribuem de modo considerável para o aumento dos poros internos. Lima, R (2005) relata que após os 450°C o diâmetro dos poros aumenta devido a essa degradação, sendo esse fator o principal responsável pelo aumento da absorção de água a temperaturas de 900°C.

A partir dos resultados de absorção de água por imersão total foi gerada uma análise variância (ANOVA) – Tabela 17 - para verificar a significância das variáveis independentes (Teor de PET e Temperatura) na variável de resposta (absorção de água).

Tabela 17 - Análise ANOVA da absorção de água por imersão total

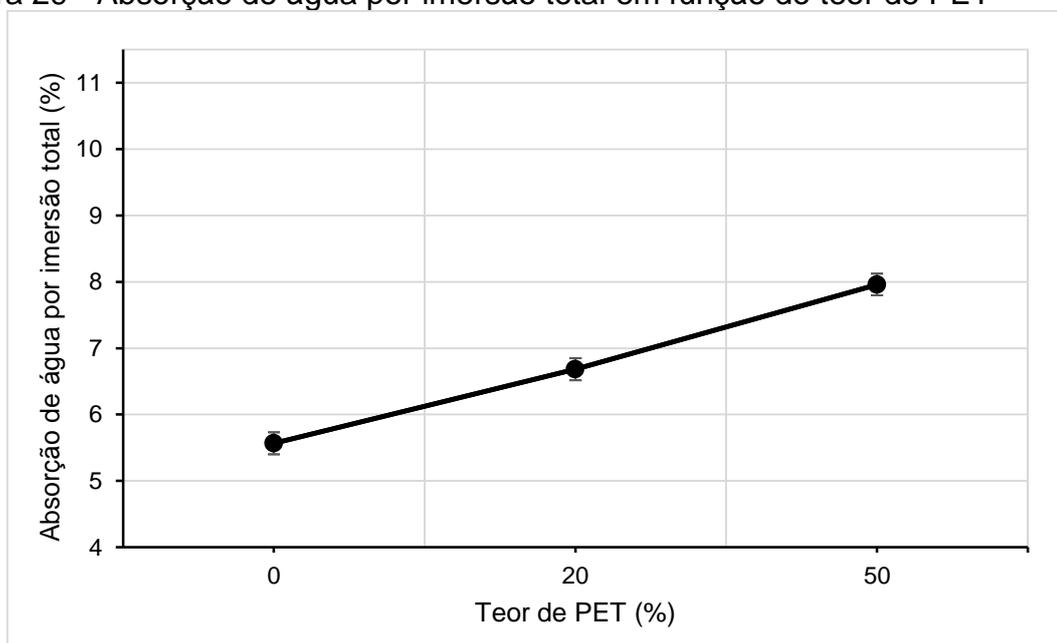
| ANOVA | SQ | GL | MQ | Teste F | p |
|---------------------------|----------|----|----------|----------|----------|
| Intercessão | 1634,046 | 1 | 1634,046 | 21274,28 | 0,000000 |
| Teor de PET | 34,372 | 2 | 17,186 | 223,75 | 0,000000 |
| Temperatura | 207,158 | 3 | 69,053 | 899,03 | 0,000000 |
| Teor de PET x Temperatura | 9,055 | 6 | 1,509 | 19,65 | 0,000000 |
| Erro | 1,843 | 24 | 0,077 | | |

Fonte: Elaboração própria.

A análise realizada (Tabela 17) mostrou que as variáveis independentes são significativas, assim como a interação entre elas (Teor de PET x Temperatura). Ou seja, as variáveis independentes influenciaram nos resultados da absorção de água por imersão total.

As Figuras 29 e 30 mostram os resultados da absorção de água por imersão total em função das variáveis independentes, obtidos a partir da análise ANOVA (Tabela 17).

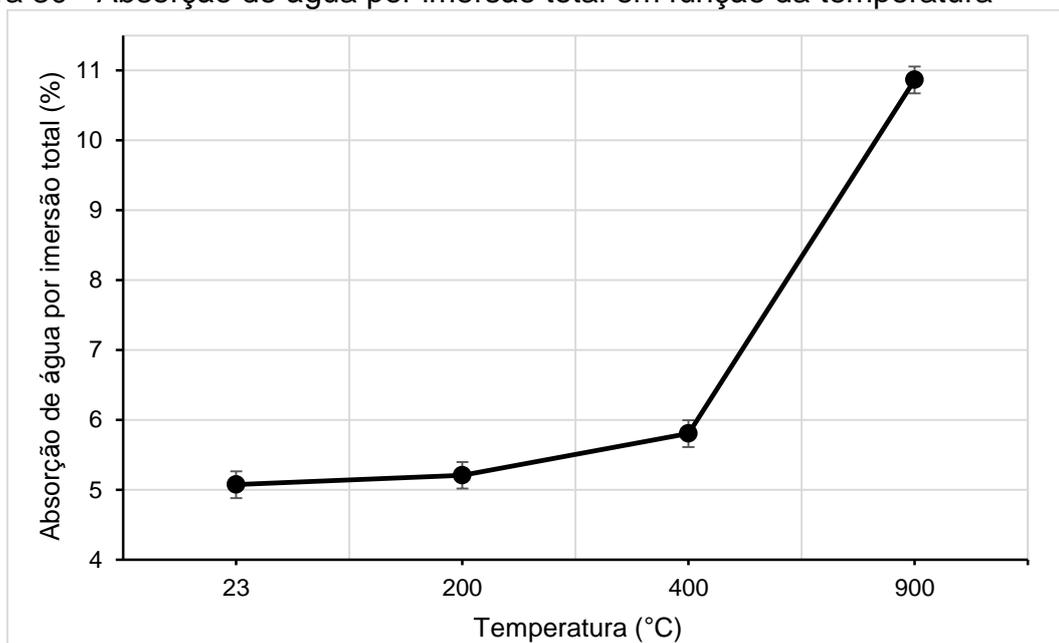
Figura 29 - Absorção de água por imersão total em função do teor de PET



Fonte: Elaboração própria.

Observa-se (Figura 29) que a variação do teor de PET promoveu um aumento significativo da absorção de água por imersão total nos concretos investigados.

Figura 30 - Absorção de água por imersão total em função da temperatura



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 30 indica que a taxa de aquecimento aplicada nos concretos promoveu um aumento significativo da absorção de água por imersão total nas misturas estudadas. Percebe-se que houve uma mudança mais expressiva entre as temperaturas de 400°C e 900°C e para determinar se realmente há significância entre as temperaturas de 23°C e 400°C foi realizada uma nova análise de variância (Tabela 18), que indicou significância também para essas oscilações de temperatura.

Tabela 18 – Análise ANOVA de absorção de água por imersão total até 400°C

| ANOVA | SQ | GL | MQ | Teste F | p |
|-------------|---------|----|---------|----------|----------|
| Intercessão | 776,097 | 1 | 776,097 | 12392,78 | 0,000000 |
| Teor de PET | 14,377 | 2 | 7,189 | 114,79 | 0,000000 |
| Temperatura | 2,719 | 2 | 1,3595 | 20,26 | 0,000010 |
| Erro | 1,4766 | 22 | 0,0671 | | |

Fonte: Elaboração própria.

4.5 Análise visual das amostras

Após as amostras serem retiradas do forno, elas foram inspecionadas e fotografadas a fim de indicar as discrepâncias entre os traços e temperaturas estudadas. A Figura 31 apresenta a comparação das amostras dos três traços na temperatura ambiente com a temperatura de 200°C.

Figura 31 - Traços estudados nas temperaturas de 23°C e 200°C



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 31 mostra que não houve diferenças visuais nas amostras expostas as temperatura de 200°C. Para essa temperatura não foi observada mudança de cor nos concretos e nem foi visualizadas fissuras na superfície das amostras. Também foi possível verificar que a areia de PET continuou intacta, como o previsto, uma vez que o PET só começa a degradar acima da temperatura de 250°C.

A Figura 32 apresenta os traços estudados após serem expostos a temperatura de 400°C.

Figura 32 - Traços estudados na temperatura de 400°C

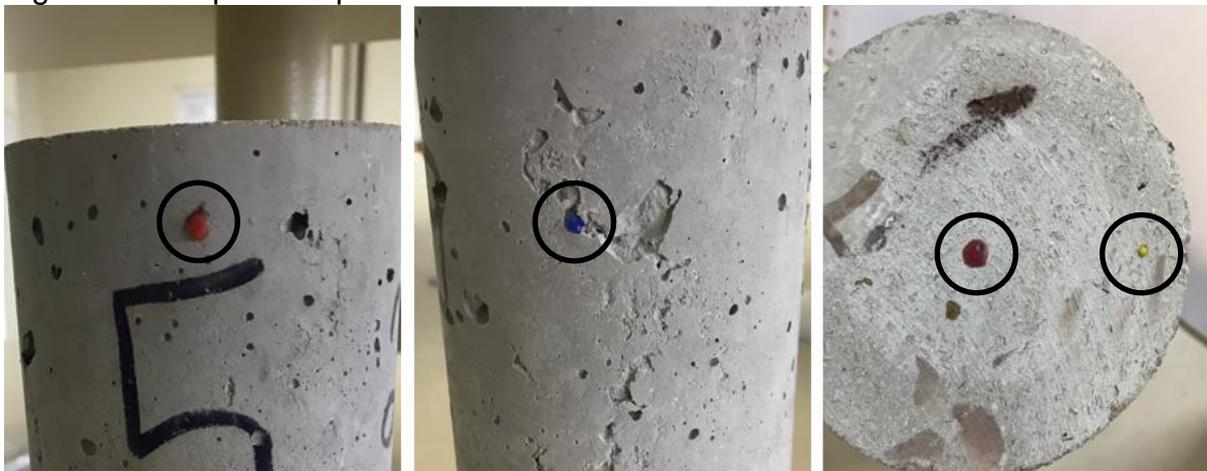


Fonte: Elaboração própria.

Nota-se (Figura 32) que em comparação com as temperaturas anteriores (200°C) houve um aumento dos poros superficiais, porém não foram observadas microfissuras superficiais.

Nos traços com presença de PET foi possível perceber que na superfície ele se degradou, e que algumas impurezas presentes na areia de PET, proveniente das tampas de garrafas plásticas, que são compostas de polietileno, derreteram e vazaram pelos poros (Figura 33).

Figura 33 – Impurezas presentes no concreto



Fonte: Elaboração própria.

Os corpos de prova foram quebrados ao meio (Figura 34), e foi possível visualizar que o PET no interior do concreto não derreteu, pois apresentava seu aspecto natural e cor transparente.

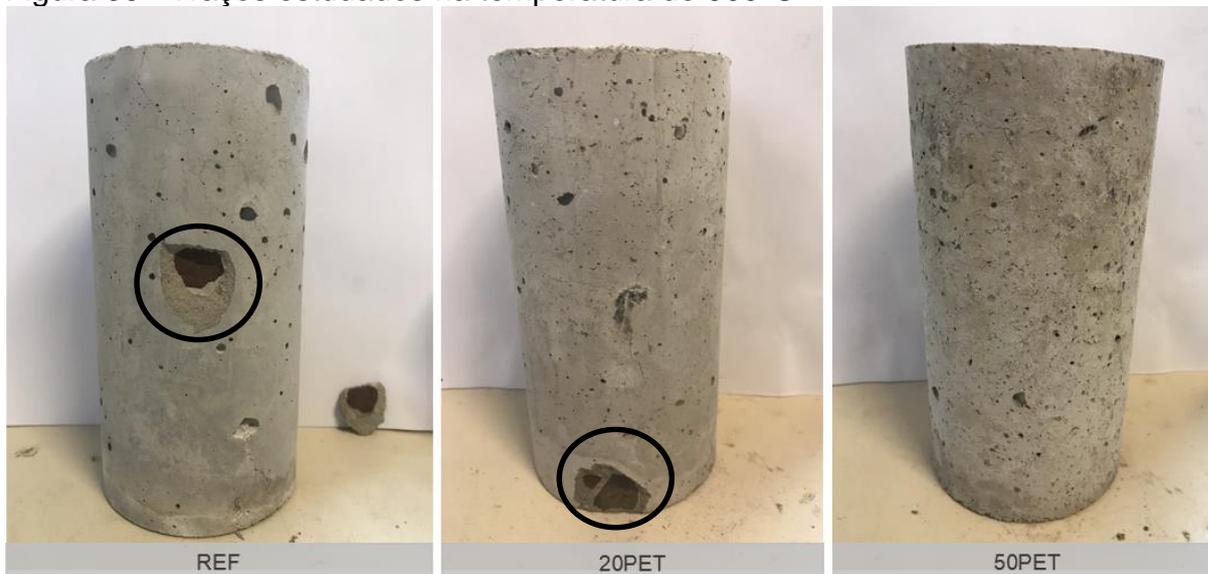
Figura 34 - PET no interior do concreto a 400°C



Fonte: Elaboração própria.

Os corpos de prova expostos a temperatura de 900°C são apresentados na Figura 35.

Figura 35 - Traços estudados na temperatura de 900°C



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 35 mostra que nos traços de referência e com 20% de PET ocorreu lascamento do agregado. Esse fenômeno pode ser explicado devido à expansão do agregado próxima a superfície. Todos os traços apresentaram microfissuras e aumento da porosidade na face externa, sendo essas características intensificadas com o aumento do teor de PET nos concretos.

O aumento da porosidade no traço com 50% de PET pode ser notado na Figura 36, onde fica visível que o PET superficial degradou completamente, ocasionando um aumento de vazios. O aumento da porosidade superficial desses concretos também pode ser observada no ensaio de absorção de água por imersão total, o qual os resultados confirmaram o aumento da absorção com o aumento do teor de PET.

A Figura 37 apresenta o interior do corpo de prova com substituição de 50% de PET, o qual mostrou que o PET no interior do concreto derreteu, perdendo seu formato original, porém não degradou completamente.

Figura 36 - Vazios ocasionados pela degradação da areia de PET superficial



Fonte: Elaboração própria.

Figura 37 - PET no interior do concreto -Traço 50PET- submetido a uma temperatura de 900°C



Fonte: Elaboração própria.

Também é possível notar na Figura 37, que o interior do corpo de prova adquiriu uma coloração escura em relação as bordas, esse aspecto já havia sido observado por Lorenzon (2014).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou a influência da substituição de areia natural por areia de PET nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos submetidos a elevadas temperaturas.

Os resultados da caracterização da areia de PET, mostraram que o material atende os limites normativos e a incorporação nos teores estudados (20% e 50%) melhoram a curva granulométrica da areia natural. Observou-se que a massa específica dos concretos com a incorporação da areia de PET diminuiu com o aumento do teor na mistura, o que já era esperado, em função da menor densidade do PET.

A avaliação da velocidade das ondas ultrassônicas mostrou que até a temperatura de 400°C a compacidade dos concretos nos três teores estudados variou entre “excelente e ótimo”. Até a temperatura de 400°C e no tempo de exposição considerados nessa pesquisa (30 minutos) não promoveram alterações expressivas na compacidade dos concretos.

Em relação as propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido, verificou-se que a resistência à compressão axial dos concretos a temperatura ambiente diminuiu com o aumento do teor de PET na mistura, a mistura com substituição de 20% de PET, apesar de ter sua redução significativa, manteve a resistência à compressão axial acima do valor estipulado de 25 MPa, mínimo para ser considerado estrutural. A substituição de 50% obteve uma resistência inferior, corroborando com os resultados de Della Flora et al (2018), que verificaram que essa substituição provocou perda de desempenho, inutilizando o seu uso.

Em relação a resistência à compressão axial dos concretos submetidos as temperaturas de estudo, constatou-se que até a temperatura de 400°C não houve redução significativa dessa propriedade. De acordo com Lima, R. (2005) é recomendável a adoção de medidas de proteção passivas, aquelas incorporadas ao sistema construtivo, e ativas, que combatem após o início do incêndio, garantam que a temperatura dos elementos estruturais não ultrapassem os 400°C durante o TRRF, determinado pela NBR 14432 (ABNT, 2000), mantendo a integridade da estrutura.

Quanto a absorção de água, os resultados mostraram que tanto o teor de PET substituído quanto a temperatura, influenciaram o aumento da absorção de água e consequentemente no índice de vazios dos concretos.

Os resultados obtidos, comprovam a potencialidade da substituição parcial da areia natural no teor de 20% de areia de PET, para concretos estruturais expostos até a temperatura de 400°C. No entanto, devem ser realizadas novas pesquisas a fim de avaliar o dano real que o concreto com substituição de PET exposto a um incêndio sofre, além disso, deve-se estudar o comportamento dessa mistura em outros ambientes agressivos, para validação do uso desse material.

As Tabelas 19, 20 e 21 sintetiza os resultados obtidos ao longo da pesquisa.

Tabela 19 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa em relação ao teor de PET

| Propriedades Avaliadas | Resultado |
|---|---|
| Velocidade de propagação de onda ultrassônica |  |
| Resistência à compressão axial |  |
| Absorção de água por imersão total |  |

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 20 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa em relação a temperatura de 23°C a 400°C

| Propriedades Avaliadas | Resultado |
|---|---|
| Velocidade de propagação de onda ultrassônica |  |
| Resistência à compressão axial |  |
| Absorção de água por imersão total |  |

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 21 - Síntese dos resultados obtidos na pesquisa em relação a temperatura de 400°C a 900°C

| Propriedades Avaliadas | Resultado |
|---|---|
| Velocidade de propagação de onda ultrassônica |  |
| Resistência à compressão axial |  |
| Absorção de água por imersão total |  |

Fonte: Elaboração Própria

- Legenda:
-  Melhorou as propriedades analisadas no ensaio.
 -  Piorou as propriedades analisadas no ensaio.
 -  Manteve as propriedades analisadas no ensaio.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Durante o desenvolvimento da pesquisa e após a obtenção dos resultados, alguns aspectos referentes ao aquecimento do concreto foram observados e mostraram-se relevantes para investigações futuras. Desta forma, como sugestões para realização de trabalhos futuros propõe-se:

- Avaliar as propriedades mecânicas e de durabilidade na temperatura intermediária entre 400°C e 900°C, a fim de determinar a partir de que ponto o concreto passa a sofrer queda brusca de suas propriedades.
- Realizar estudos avaliando a influência da umidade interna dos concretos submetidos a elevadas temperaturas e o dano o qual o excesso de água provoca.
- Avaliar microscopicamente – através de análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) por elétrons secundários - algumas amostras de concretos com e sem PET após exposição a elevadas temperaturas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Pesquisa inédita e exclusiva revela cenário do mercado brasileiro de concreto.** <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/noticias/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto/>>. Acesso: 03 de junho de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIA DO PET – ABIPET. **Panorama: Indústria do PET no Brasil.** 2013. Disponível em: <<http://www.abipet.org.br/uploads/File/Market%20Overview%202013.pdf>>. Acesso em: 03 de junho de 2019.

ALMEIDA, M.O. et al. **Uso de areia de PET na fabricação de concretos.** Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia e Resíduos e Desenvolvimento Sustentável – Livro de Resumos, pp.39, Santa Catarina, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **NBR 14432: Exigência de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2001.

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

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

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2007.

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

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

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

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

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

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

ANDERBERG, Yngve et al. **Spalling phenomena of HPC and OC.** NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete in Gaithersburg, 1997.

BAUER, F. L. A. **Materiais de Construção.** 5ª ed. revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 471p.

BUCHANAN, Andrew H.; ABU, Anthony Kwabena. **Structural design for fire safety.** John Wiley & Sons, 2017.

CANELLAS, Susan Sales. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas.** Rio de Janeiro, 2005

CÁNOVAS, Manuel Fernández. **Patologia e terapia do concreto armado.** Pini, 1988.

CORREIO BRAZILIENSE. **Incêndio atinge o Museu Nacional, no Rio de Janeiro,** 2018. Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/app/galeria-de-fotos/2018/09/03/interna_galeriafotos,7520/3-9-incendio-atinge-museu-nacional-no-rio-de-janeiro.shtml>. Acesso em: 09 de junho de 2019.

COSTA, Carla Neves. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio.** São Paulo, 2008.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas.** NUTAU'2002. Sustentabilidade arquitetura desenho urbano: seminário internacional, 2002.

CUOGHI, Ricardo de Scarabello. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio.** São Paulo, 2006.

DA SILVA, Rodrigo Rogério Cerqueira; DE SAMPAIO BONFIM, Luis Henrique. **Análise do comportamento mecânico de concreto com diferentes tipos de adição de fibras através da propagação de onda ultrassônica.** Exatas & Engenharia, v. 9, n. 25, 2019.

DELLA FLORA, Diovana et al. **Estudo do comportamento mecânico e de durabilidade de concretos convencionais confeccionados com Politereftalato de etileno (PET).** In: 60º Congresso Brasileiro do Concreto, 2018, Foz do Iguaçu/PR. 60º Congresso Brasileiro do Concreto. São Paulo: IBRACON, 2018. v. 60.

DRYSDALE, Dougal. **An introduction to fire dynamics.** John Wiley & Sons, 1999.

DOS SANTOS SILVA, Klayne Kattiley et al. **Comportamento do concreto de alto desempenho submetido à temperaturas elevadas utilizando de ensaios não destrutivos e método dos elementos finitos.** 2018.

DUÓ, Danielli. **Estudo da aderência e da absorção de água em argamassas de revestimento com agregados reciclados de PET em substratos de blocos cerâmicos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Alegrete, 2017.

FERNANDES, Andriellen Paz. **Estudo da viabilidade da substituição parcial de areia natural por agregado reciclado de PET nas propriedades mecânicas e de retração por secagem de concretos convencionais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Alegrete, 2017.

FERNANDES, B. et al. **Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 10, n. 4, p. 838-863, 2017.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Incêndio destrói 6 andares de prédio no Rio**, 2004. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff2702200408.htm>>. Acesso em: 08 de maio 2019.

_____. **Há 45 anos, Andraus era consumido por incêndio**, 2017. Disponível em: <<https://acervofolha.blogfolha.uol.com.br/2017/02/24/ha-45-anos-andraus-era-consumido-por-incendio/>>. Acesso em: 05 de maio 2019

G1 SP. **Incêndio e desabamento do prédio no Largo do Paissandu completam um ano**, 2019. Disponível em: < <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/05/01/incendio-e-desabamento-do-predio-no-largo-do-paissandu-completa-um-ano-veja-o-que-se-sabe-sobre-o-caso.ghtml>>. Acesso em: 05 de maio 2019.

HERTZ, Kristian Dahl. **Limits of spalling of fire-exposed concrete**. Fire safety journal, v. 38, n. 2, p. 103-116, 2003.

JARDIM, Rosiéli Ribeiro. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de pet em concretos convencionais**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Alegrete, 2016.

JOVEM PAN. **Relembre o incêndio no edifício Joelma, marco na história quadricentenária da cidade**. Jovem Pan, 2015. Disponível em: <<https://jovempan.uol.com.br/noticias/relembre-o-incendio-no-edificio-joelma-marco-na-historia-quadricentenaria-de-sao-paulo.html>>. Acesso em: 05 de maio 2019.

KALIFA, Pierre; CHENE, Gregoire; GALLE, Christophe. **High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure**. Cement and concrete research, v. 31, n. 10, p. 1487-1499, 2001.

KHOURY, Gabriel Alexander. **Effect of fire on concrete and concrete structures**. Progress in Structural Engineering and Materials, v. 2, n. 4, p. 429-447, 2000.

KITCHEN, Andrew. **Polypropylene fibres reduce explosive spalling in fire**. Concrete, v. 35, n. 4, p. 40-1, 2001.

LIMA, Eduardo Henrique de Barros. **Resistência Residual de Colunas de Concreto Armado Submetidas a Altas Temperaturas**. Rio de Janeiro, 2017.

LIMA, Rogério Cattelan Antocheves et al. **Efeito de altas temperaturas no concreto**. SEMINÁRIO DE PATOLOGIAS DAS EDIFICAÇÕES, v. 2, 2004.

LIMA, Rogerio Cattelan Antocheves de. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. Porto Alegre, 2005.

LORENZON, Andressa. **Análise da resistência residual do concreto após exposição a altas temperaturas**. Pato Branco, 2014.

MARCELLI, Mauricio. **Sinistros na construção civil**. São Paulo: Pini, 2007.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Rio de Janeiro, 2012.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo Jose Melaragno. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. IBRACON, 2008.

MENEGON, Julia. **Avaliação da suscetibilidade da alvenaria estrutural a danos por exposição a altas temperaturas com medidas de controle de dilatação**. Porto Alegre, 2017.

MENESES, Ilzenete Andrade. **Avaliação de concreto com adição de fibras de pet submetido a altas temperaturas**. Natal, 2011.

MOURA, Natália Braga de. **Estudo da viabilidade de substituição parcial do agregado miúdo natural por resíduo de PET na fabricação de concreto leve**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete. Alegrete, 2017.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Tradução de Salvador E. Giammusso. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997.

O GLOBO. **Espuma do teto da boate foi a causa da morte das 236 pessoas, diz delegado**, 2013. Disponível em: < <https://oglobo.globo.com/brasil/espuma-do-teto-da-boate-foi-causa-da-morte-das-236-pessoas-diz-delegado-7457973> >. Acesso em: 05 de maio 2019.

RILEM, T. C. 129-MHT, **Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, Part 4 - tensile strength for service and accident conditions**. Materials and structures, v. 33, n. 2000, p. 219-23, 2000.

RINCÓN, O. et al. **Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado**. CYTED, Red Temática XV: B Durabilidad de la armadura Río de Janeiro, 1997.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica.** Porto Alegre, 1994.

SILVA, Janaina Salustio da. **Estudo de concretos de diferentes resistências à compressão submetidos a altas temperaturas sem e com incorporação de fibras de politereftalato de etileno (PET).** Natal, 2013.

SOUSA, Douglas Alves de; SILVA, Guilherme Pereira. **Estruturas de concreto em situação de incêndio.** Goiânia, 2015.

SOUZA, Adriana Aparecida Ambrosio de. **Procedimento de ensaio para verificação em laboratório da tendência ao lascamento do concreto em situação de incêndio.** Campinas, 2010

SOUZA, Luiz Ailton de Araújo et al. **Resistência e spalling do concreto sob condições de altas temperaturas.** IBRACON, 2012.

WENDT, Sheila Cristina. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica.** Porto Alegre, 2006.

WHITEHURST, E. A. **The soniscope – a device for field testing of concrete.** Research Project, Purdue University, p 1-11, 1966.

ZONA DE RISCO. **Cesp: Investigação de um grande incêndio deixa muitas lições,** 2014. Disponível em: <<https://zonaderisco.blogspot.com/2014/09/cesp-investigacao-de-um-grande-incendio.html>>. Acesso em: 05 de maio 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Massa específica no estado fresco

| Amostra | Traço | Massa específica no estado fresco (kg/m ³) |
|---------|-------|--|
| 1 | REF | 2436,24 |
| 2 | REF | 2428,03 |
| 1 | 20PET | 2375,99 |
| 2 | 20PET | 2354,10 |
| 1 | 50PET | 2309,30 |
| 2 | 50PET | 2294,78 |

APÊNDICE B – Massa específica seca

| Amostra | Traço | Massa específica seca (g/cm ³) | | | |
|---------|-------|--|-------|-------|-------|
| | | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C |
| 1 | REF | 2,33 | 2,34 | 2,33 | 2,22 |
| 2 | REF | 2,32 | 2,27 | 2,33 | 2,22 |
| 3 | REF | 2,31 | 2,32 | 2,31 | 2,22 |
| 1 | 20PET | 2,24 | 2,17 | 2,24 | 2,15 |
| 2 | 20PET | 2,22 | 2,21 | 2,23 | 2,13 |
| 3 | 20PET | 2,24 | 2,18 | 2,21 | 2,18 |
| 1 | 50PET | 2,14 | 2,13 | 2,13 | 2,03 |
| 2 | 50PET | 2,13 | 2,14 | 2,14 | 1,99 |
| 3 | 50PET | 2,16 | 2,15 | 2,15 | 2,01 |

APÊNDICE C – Ensaio de propagação de ondas ultrassônicas antes e depois da exposição a elevadas temperaturas

| Amostra | Traço | Velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (m/s) | | | | | |
|---------|-------|--|--------|-------|--------|-------|--------|
| | | Antes | Depois | Antes | Depois | Antes | Depois |
| | | 23°C | 200°C | 23°C | 400°C | 23°C | 900°C |
| 1 | REF | 5263 | 5249 | 5390 | 5115 | 5361 | 1624 |
| 2 | REF | 5305 | 5235 | 5390 | 5154 | 5420 | 1836 |
| 3 | REF | 5154 | 5305 | 5420 | 5154 | 5405 | 1666 |
| 4 | REF | 5012 | 5194 | 5305 | 5089 | 5333 | 1615 |
| 5 | REF | 5102 | 5194 | 5277 | 5154 | 5420 | 1713 |
| 6 | REF | 5025 | 5128 | 5305 | 5076 | 5309 | 1684 |
| 1 | 20PET | 4866 | 4494 | 5037 | 4773 | 5076 | 1603 |
| 2 | 20PET | 4914 | 4494 | 5076 | 4819 | 5221 | 1754 |
| 3 | 20PET | 4842 | 4484 | 4807 | 4535 | 5115 | 1619 |
| 4 | 20PET | - | - | 5076 | 4683 | 5076 | 1511 |
| 5 | 20PET | - | - | 4936 | 4524 | 5076 | 1480 |
| 6 | 20PET | - | - | 5012 | 4705 | 5050 | 1424 |
| 1 | 50PET | 4629 | 4494 | 4773 | 3861 | 4618 | 677 |
| 2 | 50PET | 4672 | 4672 | 4950 | 4115 | 4739 | 662 |
| 3 | 50PET | 4739 | 4683 | 4618 | 3944 | 4454 | 625 |
| 4 | 50PET | 4555 | 4494 | 4716 | 3780 | 4640 | 674 |
| 5 | 50PET | 4618 | 4415 | 4618 | 4115 | 4484 | 613 |
| 6 | 50PET | 4514 | 4228 | 4705 | 3816 | 4504 | 673 |

APÊNDICE D – Resistência à compressão axial

| Amostra | Traço | Fck (MPa) | | | | Desvio Padrão | | | |
|---------|-------|-----------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| | | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C |
| 1 | REF | 33,80 | 35,32 | 35,10 | 15,53 | 2,65 | 1,89 | 3,01 | 0,61 |
| 2 | REF | 30,41 | 30,91 | 34,10 | 14,75 | | | | |
| 3 | REF | 35,32 | 31,36 | 37,71 | 16,24 | | | | |
| 4 | REF | 28,90 | 33,57 | 31,60 | 15,94 | | | | |
| 5 | REF | 29,05 | 34,18 | 37,11 | 15,14 | | | | |
| 6 | REF | 32,69 | 30,96 | 40,18 | 16,24 | | | | |
| 1 | 20PET | 25,70 | 25,85 | 24,35 | 11,69 | 1,00 | 1,58 | 2,25 | 1,21 |
| 2 | 20PET | 27,90 | 24,00 | 21,95 | 14,93 | | | | |
| 3 | 20PET | 26,23 | 27,15 | 19,05 | 14,45 | | | | |
| 4 | 20PET | 27,10 | - | 23,48 | 13,58 | | | | |
| 5 | 20PET | 26,49 | - | 25,14 | 12,57 | | | | |
| 6 | 20PET | 25,10 | - | 24,44 | 12,85 | | | | |
| 1 | 50PET | 20,14 | 21,22 | 17,15 | 6,88 | 0,99 | 0,84 | 1,23 | 0,59 |
| 2 | 50PET | 20,19 | 21,68 | 18,98 | 7,17 | | | | |
| 3 | 50PET | 18,38 | 20,84 | 18,9 | 6,38 | | | | |
| 4 | 50PET | 18,9 | 20,85 | 20,39 | 5,69 | | | | |
| 5 | 50PET | 20,15 | 21,95 | 19,99 | 6,77 | | | | |
| 6 | 50PET | 18,01 | 19,55 | 20,32 | 5,88 | | | | |

APÊNDICE E – Teste de Duncan referente a resistência à compressão axial

| | Teor PET | Temperatura | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----|----------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 31,70 | 32,72 | 35,97 | 15,64 | 26,42 | 25,67 | 23,07 | 13,35 | 19,30 | 21,02 | 19,29 | 6,46 |
| 1 | 0 | 23 | | 0,29119 | 0,00011 | 0,00002 | 0,00011 | 0,00006 | 0,00005 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00017 |
| 2 | 0 | 200 | 0,29119 | | 0,00137 | 0,00002 | 0,00006 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00002 |
| 3 | 0 | 400 | 0,00011 | 0,00137 | | 0,00002 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00001 |
| 4 | 0 | 900 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | | 0,00002 | 0,00003 | 0,00003 | 0,01999 | 0,00053 | 0,00005 | 0,00044 | 0,00006 |
| 5 | 20 | 23 | 0,00011 | 0,00006 | 0,00005 | 0,00002 | | 0,43547 | 0,00133 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00002 |
| 6 | 20 | 200 | 0,00006 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00003 | 0,43547 | | 0,00891 | 0,00002 | 0,00005 | 0,00007 | 0,00003 | 0,00002 |
| 7 | 20 | 400 | 0,00005 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00133 | 0,00891 | | 0,00003 | 0,00037 | 0,03647 | 0,00044 | 0,00011 |
| 8 | 20 | 900 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,01999 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00003 | | 0,00005 | 0,00003 | 0,00006 | 0,00011 |
| 9 | 50 | 23 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00053 | 0,00003 | 0,00005 | 0,00037 | 0,00005 | | 0,07809 | 0,99458 | 0,00003 |
| 10 | 50 | 200 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00005 | 0,00005 | 0,00007 | 0,03647 | 0,00003 | 0,07809 | | 0,09355 | 0,00003 |
| 11 | 50 | 400 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00044 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00044 | 0,00006 | 0,99458 | 0,09355 | | 0,00005 |
| 12 | 50 | 900 | 0,00017 | 0,00002 | 0,00001 | 0,00006 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00011 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00005 | |

APÊNDICE F – Absorção de água por imersão total

| Amostra | Traço | Absorção de água (%) | | | | Desvio Padrão | | | |
|---------|-------|----------------------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| | | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C |
| 1 | REF | 3,97 | 4,06 | 4,78 | 8,82 | 0,13 | 0,20 | 0,21 | 0,20 |
| 2 | REF | 4,21 | 4,47 | 4,69 | 9,20 | | | | |
| 3 | REF | 4,18 | 4,25 | 5,10 | 9,11 | | | | |
| 1 | 20PET | 5,34 | 5,43 | 5,54 | 10,10 | 0,09 | 0,16 | 0,28 | 0,19 |
| 2 | 20PET | 5,29 | 5,65 | 5,62 | 10,47 | | | | |
| 3 | 20PET | 5,16 | 5,34 | 6,06 | 10,21 | | | | |
| 1 | 50PET | 5,60 | 6,19 | 7,10 | 12,88 | 0,44 | 0,25 | 0,30 | 0,53 |
| 2 | 50PET | 6,34 | 5,78 | 6,84 | 13,89 | | | | |
| 3 | 50PET | 5,57 | 5,72 | 6,50 | 13,11 | | | | |

APÊNDICE G – Índice de vazios

| Amostra | Traço | Índice de Vazios (%) | | | | Desvio Padrão | | | |
|---------|-------|----------------------|-------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| | | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C | 23°C | 200°C | 400°C | 900°C |
| 1 | REF | 9,25 | 9,50 | 11,14 | 19,55 | 0,27 | 0,32 | 0,42 | 0,45 |
| 2 | REF | 9,76 | 10,15 | 10,95 | 20,37 | | | | |
| 3 | REF | 9,64 | 9,86 | 11,75 | 20,25 | | | | |
| 1 | 20PET | 11,97 | 12,10 | 12,40 | 21,68 | 0,22 | 0,40 | 0,53 | 0,35 |
| 2 | 20PET | 11,73 | 12,59 | 12,52 | 22,30 | | | | |
| 3 | 20PET | 11,53 | 11,80 | 13,38 | 22,29 | | | | |
| 1 | 50PET | 12,02 | 13,19 | 15,11 | 26,09 | 0,86 | 0,49 | 0,56 | 0,85 |
| 2 | 50PET | 13,50 | 12,36 | 14,62 | 27,68 | | | | |
| 3 | 50PET | 12,02 | 12,31 | 14,00 | 26,33 | | | | |