

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ALVIMAR NASCIMENTO RIBEIRO

**ANALISE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE POLITEREFTALATO
DE ETILENO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SOB INFLUÊNCIA DE
TINTAS INTUMESCENTES**

**Alegrete
2021**

ALVIMAR NASCIMENTO RIBEIRO

**ANÁLISE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE POLITEREFTALATO
DE ETILENO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SOB INFLUÊNCIA DE
TINTAS INTUMESCENTES**

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

Orientador: Dra. Simone D. Venquiaruto

Co-orientador: Me. Marcelo Oliveira

**Alegrete
2021**

ALVIMAR NASCIMENTO RIBEIRO

ANALISE DE CONCRETOS COM ADIÇÃO DE POLITEREFTALATO DE ETILENO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO SOB INFLUÊNCIA DE TINTAS INTUMESCENTES

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: 06 de Outubro de 2021.

Banca examinadora:

Profa. Dra. SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO - Orientadora - UNIPAMPA

Me. Eng. MARCELO DE JESUS DIAS OLIVEIRA - Coorientador - UNIPAMPA

Prof. Me. ALDO LEONEL TEMP - UNIPAMPA

Me. Enga. DANIELLI DUÓ



Assinado eletronicamente por **Danielli Duó, Usuário Externo**, em 09/10/2021, às 14:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDO LEONEL TEMP, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/10/2021, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO DE JESUS DIAS DE OLIVEIRA, ENGENHEIRO-AREA**, em 09/10/2021, às 15:12, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **SIMONE DORNELLES VENQUIARUTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/10/2021, às 16:11, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0636448** e o código CRC **F80906A8**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar eu quero agradecer a Deus por toda proteção e força a mim concedidos nos momentos que pensei em desistir e que por algum motivo me senti só.

Agradecer a minha família por está comigo mesmo que tão distante desde o primeiro passo dessa caminhada, por todas as risadas via vídeo chamada para tentar aliviar a tensão e por todas as orações que a mim foram direcionadas.

Quero agradecer aos meus amigos, aqueles que estavam comigo durante todo o processo, ouvindo as minhas lamentações e me dando força quando necessário. Não somente os amigos que fiz na cidade de Alegrete, mas também aos meus amigos de infância que mesmo tão distante nunca deixaram de se fazer presente.

Quero agradecer a todos os profissionais da UNIPAMPA que participaram desse processo, em especial a minha orientadora Simone Dornelles Venquiaruto e meu coorientador Marcelo Oliveira, por todo apoio e paciência.

“Agora que estamos livres, somos tão infinitos
como o céu que está acima de nós”

Arthur Ruhra

RESUMO

A indústria da construção civil utiliza em sua maioria materiais naturais para a realização dos seus processos, porém em função dos recursos naturais serem finitos, vem crescendo uma preocupação mundial pela busca de materiais alternativos e viáveis. Um dos materiais que tem sido estudado em matrizes cimentícias é o Politereftalato de Etileno – PET. Este material vem sendo utilizado em estudos científicos como substituição a areia natural para a produção de concretos, em alguns trabalhos os resultados tem se mostrado promissores quando o PET é utilizado até determinados teores (20%). No entanto, para que um novo material tenha o seu uso validado é necessário que haja a verificação do seu comportamento e da sua influência nas propriedades das matrizes cimentícias ao qual foram inseridos frente a diferentes propriedades e situações atípicas, como por exemplo, no caso de um incêndio. O incêndio é um evento com grande probabilidade de ocorrência, e pode levar a estrutura sinistrada a deterioração generalizada, dependendo da sua intensidade. Exposto isso, o presente trabalho tem como intuito avaliar as propriedades mecânicas do concreto com a substituição parcial da areia natural por areia de PET, quando expostos a elevadas temperaturas, simulando um princípio de incêndio. Para o experimento foram confeccionados dois tipos de concretos, um com os agregados tradicionais (para ser utilizado como traço referência) e outro, com substituição parcial em volume de 20% da areia natural por areia de PET. Após a moldagem e cura dos concretos, parte das amostras receberam proteção física (pintura com tinta intumescente) e a outra parte permaneceu in natura (sem proteção física). Posteriormente, os concretos foram expostos à elevadas temperaturas (400°C, 600°C, 900°C) e tiveram as suas propriedades mecânicas avaliadas. Observou-se que as amostras do traço referência com proteção física apresentaram melhor desempenho mecânico em relação as amostras sem proteção, quando expostas às elevadas temperaturas, indicando eficiência da barreira física. Para os concretos com PET esse comportamento não foi observado, uma vez que os valores de resistência a compressão axial reduziram para exposições acima de 400°C, inclusive para os concretos com a proteção física. Conclui-se que para temperaturas acima de 400°C a barreira física não foi eficiente o suficiente para impedir a deterioração do PET no concreto, o que acabou resultando em perdas importantes das propriedades mecânicas desse material.

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

ABSTRACT

The civil construction industry uses mostly natural materials to carry out its processes, but due to the fact that natural resources are finite, a worldwide concern has been growing for some decades in the search for alternative and viable materials. One of the materials that has been studied in cementitious matrices is Polyethylene terephthalate – PET. This material has been used in scientific studies as a replacement for natural sand for the production of concrete, some studies have shown promising results when PET is used up to certain levels (20%). However, for a new material to have its use validated, it is necessary to verify its behavior and its influence on the properties of the cementitious matrices to which they were inserted against different properties and atypical situations, for example, in the case of a fire. Fire is an event with a high probability of occurrence, and can lead to general deterioration of the damaged structure, depending on its intensity. Having said that, the present work aims to evaluate the mechanical properties of concrete with the partial replacement of natural sand by PET sand, when exposed to high temperatures, simulating an onset of fire. For the experiment, two types of concrete were made, one with traditional aggregates (to be used as a reference mix) and the other, with partial replacement in volume of 20% of natural sand by PET sand. After molding and curing the concrete, part of the samples received physical protection (painting with intumescent paint) and the other part remained in natura (without physical protection). Subsequently, the concretes were exposed to high temperatures (400°C, 600°C, 900°C) and had their mechanical properties evaluated. It was observed that the samples of the reference mix with physical protection showed better mechanical performance compared to samples without protection, when exposed to high temperatures, indicating the efficiency of the physical barrier. For concretes with PET, this behavior was not observed, since the values of axial compression strength reduced for exposures above 400°C, including for concretes with physical protection. It is concluded that for temperatures above 400°C the physical barrier was not efficient enough to prevent the deterioration of PET in concrete, which ended up resulting in important losses of the mechanical properties of this material.

Keywords: Concrete, PET aggregate, fire exposed, intumescent paint, high temperatures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Edifício Andraus após incêndio no ano de 1972.	13
Figura 2 - Edifício Joelma durante o incêndio.	14
Figura 3 - Lojas Renner em chamas..	14
Figura 4 - Edifício Grande Avenida durante controle das chamas.	15
Figura 5 – Edifício Wilson Paes de Almeida em chamas.....	16
Figura 6 - Boate Kiss após incêndio ser controlado.	16
Figura 7 - Curva temperatura-tempo incêndio-padrão.	18
Figura 8 - Spalling na estrutura.	21
Figura 9 - Processo de intumescimento devido ao calor.	24
Figura 10 - Fluxograma do Programa Experimental.	26
Figura 11 - Curva granulométrica da areia natural e os limites normativos	28
Figura 12 - Curva granulométrica da areia de PET e os limites normativos	30
Figura 13 - Curva granulométrica da brita e os limites normativos	31
Figura 14 - Concretagem do traço referência.	33
Figura 15 - Corpos de prova em cura submersa (a) e em ambiente de laboratório (b)	34
Figura 16 - Aplicação da tinta intumescente nos corpos de prova.	34
Figura 17 - Forno elétrico Sanchis.	35
Figura 18 - Equipamento de propagação de Onda-ultrassônica	36
Figura 19 - Resistência média dos concretos em função da temperatura - Traço de Referência.	38
Figura 20 - Efeito isolado da variação da temperatura na resistência à compressão dos concretos - Traço de Referência.	40
Figura 21 – Efeito isolado da aplicação ou não aplicação da barreira física na resistência à compressão dos concretos submetidos a elevadas temperaturas - Traço de Referência.	41
Figura 22 - Resistência média dos concretos em função da temperatura - Traço de 20%PET.....	41
Figura 23 - Resistencia do traço 20%PET após ser submetido as elevadas temperaturas.	43
Figura 24 – Efeito isolado da temperatura na resistência à compressão axial dos concretos - Traço com PET.....	44
Figura 25 – Valores médios da velocidade de onda nos corpos de prova do traço REF sem barreira física antes e após aquecimento.....	45
Figura 26 – Valores médios da velocidade de onda nos corpos de prova do traço REF com barreira física antes e após aquecimento.....	47

Figura 27 – Perda de peso média dos corpos de prova do traço REF	49
Figura 28 – Perda média de peso dos corpos de prova do traço REF comparado com a resistência axial.....	49
Figura 29 – Perda de peso média dos corpos de prova do traço 20%PET.	50
Figura 30 – Perda média de peso dos corpos de prova do traço 20%PET comparado com a resistência axial.....	51
Figura 31 – Efeito isolado da temperatura na perda de peso dos concretos.	52
Figura 32 – Efeito isolado do na perda de peso dos concretos com e sem incorporação de areia de PET.	52
Figura 33 – Aspecto interno de um concreto com substituição parcial de areia natural por PET (traço 20% PET) após ser exposto a uma temperatura de 600°C.....	53
Figura 34 – Concreto do traço 20%PET com barreira física após ser exposto a 600°C.....	54
Figura 35 – Concreto do traço 20%PET após ser exposto a 400°C.....	54
Figura 36 – Concreto do traço REF após ser exposto a 600°C.....	55
Figura 37 – Concreto do traço REF após ser exposto a 900°C.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físicas e químicas do cimento Portland CP IV	27
Tabela 2 - Características físicas da areia natural.....	28
Tabela 3 - Características físicas da areia de PET.....	29
Tabela 4 - Características físicas brita basáltica.....	30
Tabela 5 - Tabela de traços para a produção dos concretos... ..	32
Tabela 6 - Quantitativo das amostras em função dos ensaios e das temperaturas de aquecimento.....	33
Tabela 7 - Variação percentual da resistência mecânica de concretos após a exposição a elevadas temperaturas em relação às suas respectivas referências a temperatura ambiente... ..	39
Tabela 8 - Análise de variância do traço de referência enfocando o efeito da temperatura e da barreira física na resistência à compressão axial.....	40
Tabela 9 - Variação percentual da resistência mecânica de concretos com PET após exposição a elevadas temperaturas em relação às suas respectivas referências a temperatura ambiente.	43
Tabela 10 - Análise de variância do traço com PET enfocando o efeito da temperatura e da barreira física na resistência à compressão axial.....	44
Tabela 11 - Classificação relacionando velocidade da onda e qualidade do concreto.....	46
Tabela 12 - Comparativo do efeito da temperatura com as propriedades mecânicas (28 dias) e a compacidade (qualidade) dos concretos.....	46
Tabela 13 - Comparativo do efeito da temperatura com as propriedades mecânicas (28 dias) e a compacidade (qualidade) dos concretos.....	48
Tabela 14 - Análise de variância dos traços Referência e com PET enfocando o efeito da temperatura e da barreira física na perda de peso dos concretos.	51

LISTA DE SIGLAS

NBR - Norma brasileira

ABNT – Associação Brasileiro de Normas Técnicas

PET - Politerftalato de etileno

CP – Corpos de prova

CONPRESP - Conselho Municipal de Preservação do Patrimônio Histórico, Cultural e Ambiental da Cidade de São Paulo

ABIPET - Associação Brasileira de da Industria de PET

CORSAN - Companhia Riograndense de Saneamento

ANOVA - Análise de variância

LISTA DE SÍMBOLOS

α – Alfa

β – Beta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Objetivos.....	10
1.1.1	Objetivo geral.....	10
1.1.2	Objetivos específicos.....	10
1.2	Justificativa.....	11
1.3	Estrutura do trabalho.....	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	Retrospectiva dos principais incêndios no Brasil.....	13
2.2	Origem e dinâmica dos incêndios.....	17
2.2.1	Processo de desenvolvimento dos incêndios.....	17
2.3	Mecanismo de transferência de calor no concreto.....	19
2.3.1	Alterações microestruturais causadas no concreto por elevadas temperaturas.....	19
2.3.2	Alterações macroestruturais causadas no concreto por elevadas temperaturas.....	20
2.4	A água em uma matriz cimentícia em situação de incêndio.....	22
2.5	Comportamento dos agregados convencionais e de PET em elevadas temperaturas.....	22
2.6	Tintas intumescentes com alternativa de amezinar a ação do fogo no concreto.....	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1	Materiais.....	27
3.1.1	Aglomerante.....	27
3.1.2	Agregados naturais miudo.....	27
3.1.3	Agregado miudo reciclado de PET.....	29
3.1.4	Agregado graúdo.....	30
3.1.5	Água.....	31
3.1.6	Aditivo.....	31
3.1.7	Tintas intumescentes.....	32
3.2	Procedimento de dosagem, mistura e moldagem de concreto.....	32
3.2.1	Produção de concretos e aplicação das barreiras físicas.....	33
3.2.2	Aquecimento dos concretos a diferentes temperaturas.....	35
3.3	Propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido.....	36
3.3.1	Ensaio de propagação de Onda-ultrassônica.....	36
3.3.2	Redução do peso do concreto.....	36
3.3.3	Resistência a compressão axial.....	37

4	RESULTADOS	38
4.1	Resistência a compressão axial	38
4.2	Propagação da Onda-Ultrassônica.....	45
4.3	Efeito de elevadas temperaturas no peso dos concretos.....	48
4.4	Análise visual dos concretos submetidos a elevadas temperaturas.....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.1	Sugestões de trabalhos futuros	58
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICES	64

1 INTRODUÇÃO

Grandes eventos de incêndio em edificações, como o desastre da Boate Kiss (2013) e o Edifício Wilson Paes de Almeida (2019), estão mais presentes na construção civil do que se pode imaginar. Segundo dados do Instituto Sprinkler Brasil, no ano de 2019 o Brasil contabilizou 866 ocorrências de incêndio anunciados pela imprensa, com aproximadamente 25% dessas ocorrências sendo em lojas, shopping center e supermercados, ou seja, locais de grande movimentações e aglomeração de pessoas. Além disso, no ano de 2015 o Brasil apareceu em terceiro lugar no ranking mundial de óbitos causados por incêndios, ficando atrás apenas do Estados Unidos e Japão, segundo dados da Geneva Association, também disponibilizados pela Instituto Sprinkler Brasil.

Ao longo dos anos (Lima E (2017), Metha e Monteiro (2008) e Dacheri (2019), entre outros) voltaram o seu interesse sobre a ação do fogo no concreto, essas pesquisas contribuíram para um melhor entendimento dos danos causados pelo fogo e do comportamento das estruturas sujeitas a este tipo de sinistro. Como apontado por Morales (2011), o concreto convencional perde parte considerável da sua resistência quando exposto a temperaturas elevadas, pois acaba por sofrer modificações em sua matriz cimentícia, modificações essas que ocorrem tanto na macroestrutura do concreto quanto na microestrutura, porém em diferentes proporções. Lima, E. (2017) e Metha e Monteiro (2008), mostraram que as mudanças microestruturais de concretos submetidos a incêndios estão ligadas diretamente a variação da temperatura, e essas mudanças acontecem gradativamente nas moléculas que compõem a mistura. Para os autores essas mudanças vão desde a formação de novos silicatos de cálcio (C-S-H) a 110°C, até a sua decomposição completa, aos 900°C. Já as mudanças macroestruturais, segundo Fernandes (2017), surgem durante o processo de aquecimento. O autor reforça que em uma situação de incêndio, a matriz cimentícia sofre expansões térmicas, a pasta retrai em função da evaporação da água, enquanto que os agregados expandem, resultando na fissuração do concreto, principalmente na zona de transição, parte mais frágil da matriz.

Com a possibilidade de inserção de novos materiais na construção civil, surgem pesquisas como a de Darechi (2019), que estudou a performance do concreto com adição parcial de areia de PET (politereftalato de etileno) quando exposto a altas temperaturas. Através do seu trabalho a autora verificou que a substituição de 20% da areia natural por areia de PET em concretos expostos a temperaturas de até 400°C, não modificou de maneira significativa o desempenho mecânico dos concretos. Porém, para temperaturas mais elevadas, Darechi (2019) observou que os concretos com areia de PET apresentaram perda acentuada das suas

propriedades mecânicas em comparação aos concretos de referência (sem adição de PET), o que como consideração final, inviabilizaria o uso do Politereftalato de etileno na indústria da construção.

O desenvolvimento dessa pesquisa foi motivado pelo estudo de Darechi (2019), e também pela disponibilidade de produtos que podem ser utilizados como proteção aos concretos em uma situação de incêndio. Atualmente, com a constante modernização do mercado da engenharia civil, têm surgido novos produtos que atuam como uma barreira física sobre os concretos, garantindo em caso de um incêndio a integridade física das suas propriedades por um determinado período de tempo. Entre esses novos materiais, está a tinta intumescente.

A tinta intumescente é uma das opções modernas de proteção física de substratos como o concreto. A intumescência é quando a superfície protegida entra em contato com temperaturas superiores a 200°C, resultando na expansão da camada de proteção em até 60 vezes a espessura seca original do material, promovendo a proteção térmica do substrato de concreto em temperaturas superiores a 1000°C (BRITTEZ *et al.*, 2019).

Em função do exposto, esta pesquisa busca avaliar o comportamento de concretos estruturais (25MPa) com adição de Politereftalato de Etileno em elevadas temperaturas, sob influência de tinta intumescente.

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 propriedades mecânicas de concretos com adição parcial de Politereftalato de etileno (PET) com e sem barreiras físicas (tinta intumescente), expostos a elevadas temperaturas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a perda de massa de concretos convencionais (referência) e de concretos com PET, com e sem barreira física contra o fogo, antes e após a exposição a elevadas temperaturas.

- Avaliar a compacidade - através do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica - de concretos convencionais (referência) e de concretos com PET, com e sem barreira física contra o fogo, antes e após a exposição a elevadas temperaturas.
- Avaliar a propriedade mecânica de resistência à compressão axial de concretos convencionais (referência) e de concretos com PET, com e sem barreira física contra o fogo, após exposição a elevadas temperaturas.

1.2 Justificativa

O crescimento exponencial da construção civil ao longo dos anos, trouxe junto com as grandes obras de engenharia, uma preocupação com os recursos básicos que abastecem o setor. Essa preocupação deve-se principalmente a possibilidade de escassez de alguns materiais, visto que, boa parte da matéria prima utilizada no setor são extraídos da natureza.

Do outro lado, com o constante crescimento populacional é notável o aumento na quantidade de resíduos produzidos no dia a dia, tanto pela indústria quanto pela população. Dentre esses resíduos, encontramos o PET na forma de garrafas e utensílios.

No Brasil o resíduo de PET tem sido aproveitado na indústria, mas ainda com pouca representatividade, segundo Hendges (2014), apenas 59% das 562 mil toneladas de PET produzido no Brasil são reciclados, perdendo então cerca de 231 mil toneladas desse material. A possibilidade da incorporação do resíduo de PET em matrizes cimentícias tem chamado a atenção de alguns pesquisadores há alguns anos. Canellas (2005), Jardim (2016), Duó (2017), Dacheri (2020), Spósito (2020), entre outros, voltaram as suas pesquisas para este tema, com o intuito de validar a inserção desse material no mercado da construção civil. A utilização do resíduo de PET na matriz cimentícia permitiria a colocação no mercado de um novo material, que é de fácil acesso, barato e que existe em quantidade notável atualmente. Somado a isso, ressalta-se a relevante contribuição que a indústria da construção faria para o meio ambiente, pois estaria sendo retirado da natureza um material de difícil degradação, e que causa atualmente um grande impacto ambiental. Além do exposto, o aproveitamento do resíduo de PET contribuiria para a redução do impacto causado pela extração de recursos naturais.

Estudos feitos por Canellas (2005), Jardim (2016), Duó (2017) afirmam a potencialidade desse material em matrizes cimentícias para determinados teores de substituição ao agregado miúdo, principalmente quando submetido ao esforço mecânico de compressão. No entanto, existe uma lacuna quanto ao desempenho de concretos com PET frente a ambientes agressivos, como em uma situação de incêndio, por exemplo.

Segundo, Morales *et al.* (2011) o concreto convencional perde parte considerável da sua resistência quando exposto a temperaturas elevadas, pois acaba por sofrer modificações em sua matriz cimentícia. Elevadas temperaturas, como em uma situação de incêndio, promovem a perda da resistência mecânica dos concretos, induz a fissuração e lascamentos e até ao comprometimento da estabilidade do elemento estrutural como um todo. Assim, antes de difundir o uso de um novo material em compósitos cimentícios é importante a validação do desempenho do concreto composto, avaliando não só as propriedades mecânicas, mas o comportamento em situações críticas, como a de um incêndio.

Hoje a indústria da construção civil já disponibiliza de algumas ferramentas que contribuem para a resistência dos elementos estruturais, quando em situação de incêndio, como as tintas intumescentes. A tinta intumescente atua como uma barreira física em situações de incêndio, protegendo os elementos sobre a qual foi aplicada. Dessa forma, esses produtos, podem se tornar um aliado para a inserção de novos materiais que possam apresentar baixa resistência ao fogo em matrizes cimentícias, como é o caso do resíduo de PET.

Em função do exposto, o estudo das propriedades do concreto com substituição parcial de agregado miúdo por agregado de PET submetidos a temperaturas elevadas, com e sem barreiras físicas (tintas intumescentes), justificam a relevância dessa pesquisa. É importante mensurar o quanto a tinta intumescente pode auxiliar na manutenção das propriedades de concretos de composição não convencional em situações de incêndio, principalmente para o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o tema.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em quatro 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 sobre do assunto abordado, e o capítulo três, a metodologia que foi adotada para alcançar os objetivos apresentados, no capítulo quatro a apresentação e análise dos resultados obtidos em laboratório e no capítulo cinco as considerações finais. Por fim, apresenta-se as referências bibliográficas consultadas.

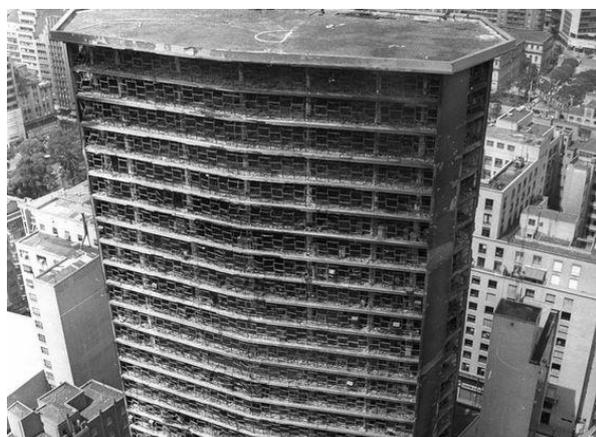
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda primeiramente a contextualização do tema da pesquisa, por meio de um levantamento dos principais incêndios ocorridos no Brasil. Em seguida, é dissertado sobre a origem e a dinâmica dos incêndios, os mecanismos de transferência de calor no concreto, e sobre o comportamento da água em uma matriz cimentícia em situação de incêndio. Por fim, é dissertado sobre o comportamento dos agregados convencionais e de PET em concretos submetidos a elevadas temperaturas, e sobre o uso de tintas intumescentes como alternativa para minimizar a ação do fogo em estruturas de concreto.

2.1 Retrospectiva dos principais incêndios no Brasil

O Brasil ao longo dos anos foi palco de grandes eventos de incêndio que marcaram a sua história. É possível traçar uma linha do tempo pontuando alguns dos principais sinistros mais relevantes, como por exemplo o caso do Edifício Andraus (Figura 1), no ano de 1972 na cidade de São Paulo – SP, o caso do Edifício Joelma (1976), o caso do edifício das Lojas Renner (1976), o Edifício Grande Avenida (1981), entre tantos outros.

Figura 1 – Edifício Andraus após incêndio no ano de 1972.



Fonte: Vellamo Engenharia e Projetos, 2018.

Até hoje a causa do início do incêndio do Edifício Andraus é desconhecida, porém o mesmo foi de tamanha gravidade a ponto de moradores relatarem que era possível ouvir explosões no edifício de tão grandes proporções que causavam tremores na estrutura. Esse evento catastrófico conta com 16 mortes, 330 feridos e com os sobreviventes tendo que ser resgatados pela cobertura através de helicópteros, segundo dados da Defesa Civil de São Paulo.

Em 1976 houve a ocorrência no edifício Joelma (Figura 2), também localizado na cidade de São Paulo – SP.

Figura 2 – Edifício Joelma durante o incêndio.



Fonte: Correio Braziliense (2015).

Após inquérito, o corpo de bombeiro local concluiu que o sinistro foi devido a um problema elétrico em um aparelho de ar condicionado no 12º piso. Esse foco de incêndio logo se espalhou devido a quantidade de mobília de madeira, pisos e forros internos de fibra sintética. Como o fogo se espalhou em pouco tempo, tomando escadas e gerando uma densa fumaça, não houve facilidade para evacuação do edifício, deixando como consequência 191 mortes e mais de 300 pessoas feridas segundo dados da defesa civil local.

O incêndio no prédio localizado na cidade de Porto Alegre – RS onde funcionava a empresa de varejo Lojas Renner (Figura 3) entrou para a história no ano de 1976.

Figura 3 – Lojas Renner em chamas.



Fonte: Almanaque Cultural Brasileiro (2019)

Devido às más instalações do edifício há registros de pessoas que estavam no interior do mesmo se atirando do 7º andar como forma de fugir de sinistro, pois o edifício não possuía estrutura para resgate com helicópteros.

Com 41 mortos e mais de 60 feridos esse é um evento que marcou a história do Brasil e até hoje não foi encontrado o que causou o início do sinistro.

Na avenida Paulista na cidade de São Paulo no ano de 1981, o Edifício Grande Avenida (Figura 4) foi palco do maior evento de incêndio da região.

Figura 4 – Edifício Grande Avenida durante controle das chamas.



Fonte: Folha de São Paulo (2015).

O sinistro foi de tamanha gravidade que todos os 15 andares do edifício foram completamente destruídos pelas chamas. O incêndio aconteceu em um sábado de carnaval o que fez com que os números de vítimas fossem reduzidos segundo a corporação de bombeiro que tratou o caso, porém deixou 17 mortos e aproximadamente 100 feridos.

O último grande incêndio que cominou até mesmo no desabamento do edifício e teve grande repercussão na mídia nacional, foi o do prédio Wilson Paes de Almeida (figura 5). O edifício localizado na cidade de São Paulo capital, possuía 24 andares e foi projetado no ano de 1961, porém no ano de 1992 foi considerado pela Conselho Municipal de Preservação do Patrimônio Histórico, Cultural e Ambiental da Cidade de São Paulo (CONPRESP) como um bem de interesse histórico, arquitetônico e paisagístico deixando o prédio vazio desde então, logo, no ano de 2003 o prédio começou a ser habitado irregularmente.

Figura 5 – Edifício Wilson Paes de Almeida em chamas.

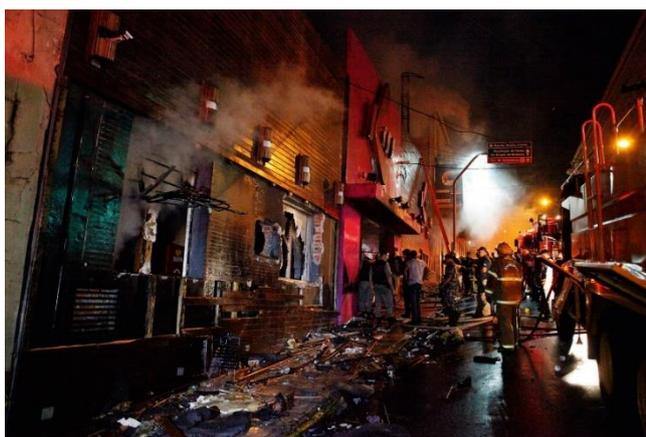


Fonte: G1 São Paulo (2019).

Após diversas especulações, a hipótese mais aceita segundo o corpo de bombeiros local, é de que o sinistro aconteceu devido a um curto-circuito em uma tomada onde estava plugado três aparelhos eletroeletrônicos: micro-ondas, geladeira e uma TV. O sinistro deixou 7 mortes e 2 desaparecidos, todos as vítimas eram moradores de rua.

Outra catástrofe que marcou a história do Brasil a ponto de reestruturar as normativas referente a prevenção a incêndios, foi o da Boate Kiss (Figura 6) que aconteceu no ano de 2013 na cidade de Santa Maria – RS.

Figura 6 - Boate Kiss após incêndio ser controlado.



Fonte: Veja (2015).

Deixando 242 mortos e mais de 600 feridos, segundo dados da Defesa Civil, o incêndio foi causado devido a um show pirotécnico que saiu do controle dentro do estabelecimento sem alvará.

Assim, com tantos eventos marcantes é imprescindível a inserção de materiais testados e seguros para que a consequência de situações adversas (como a de um incêndio) possam ser minimizadas, de forma a evitar tragédias e trazer conforto e confiabilidade para o usuário das edificações.

2.2 Origem e dinâmica dos incêndios

Segundo Marcelli (2007), o incêndio pode ser definido como um evento de grande complexidade relacionado à o avanço tecnológico do país e aos materiais aplicados nas construções atualmente, já Buchanan (2017) diz que o incêndio é considerado uma força destrutiva causada pela propagação de fogo indesejado.

Nas diversas situações de grandes incêndios registrados, os elementos que causaram o início do fogo foram os mais diversos possíveis, variando em cada evento e em pouquíssimas vezes se assimilando. Porém, em formas gerais, o processo que envolve o fogo, é formado por uma reação química entre combustível e o oxigênio (DRYSDALE, 1999 *apud* DACHERI, 2019). Logo, o fogo acontece devido a uma reação química entre três elementos: o combustível, o comburente (oxigênio) e uma fonte de energia de ativação (calor) que produz o desprendimento de luz e calor intenso (AITA *et al.*, 2012)

Apesar da forte relação entre fogo e incêndio, os mesmos podem ser diferenciados, sendo, fogo o desenvolvimento simultâneo de calor e luz, produto da combustão de materiais inflamáveis, como, por exemplo, a madeira, já incêndio é definido como fogo que lavra com intensidade, em material que não estava a ele destinado, destruindo e às vezes causando prejuízos (CALDAS, 2008).

2.2.1 Processos de desenvolvimento do Incêndio

Apesar do elemento fogo ser único, a sua origem pode ser diversa, como explicitado por Caldas (2008) o fogo pode ter origem física (raios, eletricidade, centelhas devido à eletricidade estática, curtos-circuitos e calor devido ao atrito de peças em movimento), biológica (ação de bactérias termogênicas), físico-química (hidrocarbonetos insaturados e gorduras animais e vegetais em certas condições de confinamento), acidental (involuntariamente criado pelo homem). Contudo, na construção civil a origem do fogo indesejado, nomeado como incêndio, na sua grande maioria tem causa física, mas especificamente devido a eletricidade.

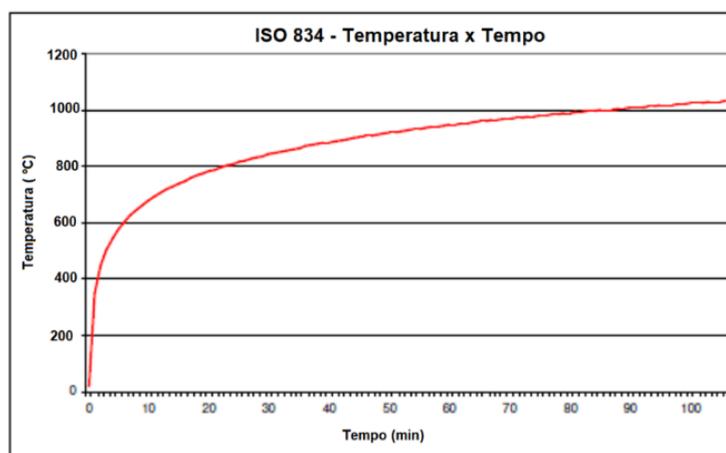
Ao iniciar o incêndio, temos o período conhecido como pré-flashover (BUCHANAN, 2017), onde a temperatura está aumentando gradativamente, porém se restringe apenas ao material envolvido na combustão inicial, e então com o aumento da temperatura o calor acaba

por se propagar. Segundo Lima, R. (2005), durante essa etapa, as chamas estão no material combustível onde se iniciou a combustão e através da transferência de calor - condução, convecção e radiação - o calor se propaga para todo o ambiente.

Marcelli (2007) afirma que a duração do sinistro está diretamente ligada a dois fatores, a quantidade de materiais combustíveis e a quantidade de oxigênio que pode entrar no ambiente. Ou seja, por mais que a origem possa ser a rede elétrica, por exemplo, a propagação descontrolada das chamas ocorrerá através da combustão de mobílias e aparelhos eletroeletrônicos que compõem a residência. Segundo o autor, esse curto espaço de tempo onde todos os materiais estão em combustão é denominado flashover. O flashover é considerado o momento mais crítico do incêndio, onde há combustão generalizada.

Para tentar caracterizar o comportamento do incêndio desde o pré-flashover até o flashover, há uma curva simplificada (Figura 7) que relaciona a crescente temperatura com o tempo, assim podendo retirar dados como; em quanto tempo nas situações de ensaio o incêndio atingiria o flashover. A curva patronizada pela ISO – 834 (1994) é utilizada internacionalmente para caracterizar o incêndio.

Figura 7 – Curva temperatura-tempo incêndio-padrão.



Fonte: Coughi (2006).

É importante salientar que o gráfico foi gerado a partir de uma experiência laboratorial, e que cada incêndio possui suas próprias características dependendo da situação em que acontece, como explicado por Marcelli (2007), o que torna o mesmo apenas uma estimativa.

Após o material combustível ter sido consumido, o fogo vai sendo resfriado gradualmente, esse período é chamado de pós-flashover (BUCHANAN, 2017). Porém, a perda de força do fogo não indica que o perigo cessou, pois, a redução do calor no ambiente é lenta, o que significa que a estrutura ficará exposta a elevadas temperaturas durante um período,

mesmo pós o extinguir das chamas. Para os projetistas isto é preocupante, pois o concreto segue fazendo a transferência de calor com o ambiente, podendo agravar a situação crítica em que a estrutura já se encontra.

2.3 Mecanismos de transferência de calor no concreto

Radiação, convecção e condução são formas de transferências de calor que se diferenciam pelas suas performances na movimentação da energia. Bezerra (2003), traz definições mais específicas sobre cada forma de transferência de calor. A radiação térmica, emitida por toda matéria com temperatura acima de $273,1^{\circ}\text{C}$, é uma forma de transmissão de calor que não necessita de um meio material para a propagação, pois a energia é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas. Já na convecção térmica a transferência de calor acontece através do transporte de massa. Por último o autor define a condução como o modo de transferência de calor que está diretamente relacionado à atividade atômica, molecular e eletrônica.

O concreto, caracterizado como um elemento sólido, apresenta as três configurações de transferências de calor. O calor é transmitido dentro de um sólido por condução e é transferido a partir de um sólido por convecção e por radiação (CALDAS, 2008). Assim, quando exposto a condição de incêndio, o elemento estrutural constituído na maioria das vezes de concreto tem a possibilidade de interagir com o sinistro nas três configurações de transferência de calor, apresentando maior disposição em sofrer danos.

2.3.1 Alterações microestruturais causadas no concreto por elevadas temperaturas

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

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

O concreto é composto por diversos materiais, logo, no produto final se encontra elementos com diferentes características térmicas, o que impulsiona o surgimento de patologias quando o mesmo é exposto ao sinistro. Lima, R. (2005), enfatiza que durante o aquecimento as partículas do agregado começam a expandir e gerar tensões diferenciais no interior do concreto, que podem levar ao aparecimento de microfissuras.

Um estudo feito por Lima, R. (2005), relaciona a proporção cálcio (Ca) e silicato (Si) em concretos com o aumento gradativo da temperatura. Segundo o autor, mesmo à temperatura de 110°C já pode ser observado a formação de novos silicatos de cálcio, porém com estruturas cristalinas fragilizadas. Após a temperatura de 300°C a porosidade do concreto aumenta expressivamente, como resposta as tensões internas solicitantes causadas pelo aumento da temperatura. Na temperatura de 300°C, também pôde ser observado o surgimento de microfissuras na microestrutura do concreto, resultado da nova estrutura cristalina frágil, do aumento de poros no concreto e da grande pressão interna. Ao ultrapassar a temperatura de 400°C, Lima, R. (2005) observou que ocorre uma acentuada perda de peso dos concretos, 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).

A capacidade resistiva do concreto apresenta queda pela a redução de densidade devido a porosidade, porém a situação se agrava com as microfissuras, pois as mesmas criam caminhos para mudanças macroestruturais como lascamentos.

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).

2.3.2 Alterações macroestruturais causadas no concreto por 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, R *et al.*, 2004).

A degradação da estrutura segue uma logica que comina no deslocamento do concreto, indicando então que o elemento estrutural está completamente comprometido. Inicialmente ocorre o surgimento de fissuras que com o proseguir da exposição do concreto ao sinitro tendem a se intensificar.

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).

O grau de fissuração intensifica-se nas juntas, nas regiões mal adensadas e nos planos de barras de armadura, havendo uma perda significativa de material nestes locais, que pode levar ao desaparecimento da camada de cobrimento. Quando o aquecimento alcança o nível da

armadura, a mesma passa a conduzir calor, acelerando o processo de aquecimento (NEVILLE, 1997; LIMA, KIRCHHOF, SILVA FILHO & CASONATO 2003),

Outro fenômeno comum de ser observado em concretos em situação de incêndio é o lascamento, comumente denominado *spalling* (Figura 8). Buchanan (2017) deixa bem claro que, o lascamento é considerado um fenômeno não muito bem compreendido, pois depende de vários fatores, como a perda de umidade do concreto, a porosidade do concreto, o gradiente de temperatura na estrutura, entre outros.

Figura 8 - Spalling na estrutura.



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

Um dos fatores relacionados ao deslocamento é a perda de umidade do concreto para o ambiente. Nesta situação, pode-se observar o protagonismo do grau de porosidade do concreto. Quanto mais poroso o concreto, maior a facilidade de perda de água para o ambiente, evitando o acúmulo de tensões dentro da estrutura (devido o vapor de água aprisionado). 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.

Outro ponto interessante de ser analisado, é o gradiente de temperatura que é criado dentro da estrutura de concreto devido as suas faces externas estarem expostas as elevadas temperaturas. O concreto possui uma baixa condutividade térmica, logo, o elemento não aquece uniformemente causando assim, diferenças de temperaturas na peça. Evidências empíricas mostraram que, durante um incêndio, em um concreto com um certo grau de umidade, exposto a um elevado gradiente de temperatura, pode ocorrer o deslocamento das camadas superficiais quentes, das camadas interiores, mais frias (LIMA *et al.*, 2004).

A complexidade de fatores dos deslocamentos resultam em danos consideráveis a estrutura, pois ocorrem perdas bruscas na resistência do concreto que podem levar, até mesmo, ao colapso dos elementos estruturais aquecidos (PHAN & CARINO, 1998).

2.4 A água em uma matriz cimentícia em situação de incêndio

A água presente no concreto influencia de tal forma que concretos com diferentes características são gerados com base na quantidade de água presente na mistura. Concretos feitos com uma mesma quantidade de cimento, mas com diferentes teores de água, apresentam uma estrutura completamente diferente (LIMA, R., 2004).

Quando exposto a elevadas temperaturas ocorrem diversas alterações no concreto tanto macroestrutural como lascamentos e perda de resistência mecânica, quanto, microestrutural como o aumento de poros e o surgimento de microfissuração. Segundo Mehta (1994), as alterações de comportamento são resultantes da evaporação da água presente na matriz cimentícia, sob forma livre ou combinada, durante o processo aquecimento.

Para Mehta (1994), o aumento da temperatura, as mudanças no concreto e a transformação da água presente na mistura podem ser facilmente correlacionadas. Segundo o autor, com o aumento da temperatura a água começa a sofrer transformações, que a partir dos 200°C geram mudanças na estrutura do concreto. Quando o concreto é exposto ao fogo, a sua temperatura não se elevará até que toda a água evaporável tenha sido removida, sendo necessário um considerável calor de vaporização para a conversão de água em vapor. Segundo Mehta (1994), a água livre e a água capilar, presentes na pasta de cimento, começam a evaporar após a temperatura de 100°C, retardando o aquecimento do concreto. A evaporação total da água capilar ocorre entre 200°C e 300°C, mas neste patamar ainda não são significativas as alterações na estrutura do cimento hidratado, bem como seu reflexo na resistência do concreto. No entanto, segundo o autor, após a temperatura de 300°C já começa a ocorrer perda na resistência do concreto.

O concreto exposto a altas temperaturas sofre mudanças na sua microestrutura e na sua macroestrutura, porém o desenvolver dessas mudanças frente a situação de incêndio é fortemente influenciada pela água presente na mistura, de forma a determinar até mesmo o momento de colapso total (BEZERRA, 2003).

2.5 Comportamento dos agregados convencionais e de PET em elevadas temperaturas

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

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).

É importante salientar que o coeficiente de dilatação do agregado está ligado à sua formação geológica, pois os minerais que são adicionados a ele na sua formação influenciam diretamente na suas características físico-químicas.

Mehta e Monteiro (2008), explicam que ao serem submetidos a temperaturas em torno 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.

Já o PET apresenta uma baixa resistência a temperatura, o que o favorece a ser utilizado na reciclagem. Segundo Pezzin (2007), o polietileno tereftalato (PET) quando exposto a temperatura maior que 250°, amolece e flui, podendo ser moldado nessas condições. O material pode ser posteriormente remodelado por meio de exposição a aplicação de pressão e temperatura, tornando-se, assim, um material reciclável.

No concreto o PET passar a ser mais suscetível a degradação devido a presença de água e oxigênio. A presença de oxigênio induz um processo de degradação oxidativa que junto com a degradação térmica e a umidade provocam a quebra das cadeias de ligação, reduzindo o peso molecular do polímero segundo a Associação Brasileira de da Industria de PET (ABIPET).

Apesar da possível ampla área de pesquisa referente ao comportamento do PET quando incorporado ao concreto, ainda existem poucos trabalhos científicos que se dedicam a esse tema. Alguns pesquisadores como Dacheri (2020), Spósito (2020), Silva, J. (2013), entre outros, tem exposto o tema e norteado um caminho para a discussão sobre o mesmo.

2.6 Tintas intumescentes como alternativa de amezinar a ação do fogo no concreto

Os materiais de proteção térmica são concebidos para retardar o processo de transferência de calor da combustão para o elemento estrutural, protelando o efeito da variação de temperatura sobre a resistência do mesmo (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

As diversas táticas para proteção do concreto frente a situação de incêndio, vai desde mudanças na composição da mistura com adição de elementos que podem retardar a ação do

fogo no concreto, até a aplicação de tintas (tintas intumescentes) na superfície do elemento que deseja se proteger.

Oliveira *et al.* (2017) explica que tintas intumescentes são materiais de proteção visto como um composto químico que quando submetidos a temperaturas superiores a 200°, passam por diversas reações que originam uma espuma carbonizada (Figura 9) com alto desempenho isolante.

Figura 9 – Processo de intumescimento devido ao calor.



Fonte: Pintura Intumescente (2019).

Em geral, existem dois tipos de tintas que desempenham papel de proteção contra incêndio: as antichamas e as intumescentes. As tintas antichamas contribuem para controlar a propagação do fogo a uma pequena região ou, mesmo, impedir a propagação. Entretanto, este tipo de tinta não fornece proteção ao substrato onde é aplicada contra o fogo. Normalmente é destinada à proteção de estruturas ou componentes de navios e embarcações. Já as tintas intumescentes tem como foco principal a proteção do substrato em que está aplicada e são, em geral, empregadas para a proteção de estruturas metálicas, madeiras e concretos, além de substratos plásticos e tecidos (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Britez *et al.* (2019), salienta que são numerosas as pesquisas em estruturas de aço, onde esse sistema de revestimento é bastante utilizado como revestimento contrafogo, mas não se tem muitos registros, em artigos científicos, sobre a aplicação em estruturas de concreto.

Apesar das diversas variações de produto no mercado a intumescência é obtiva através de alguns compostos químicos básicos, que são eles: resinas aglomerantes, compostos espumíficos, composto carbonáceo e uma fonte de cálcio. Cada um desses componentes contribui significativamente para o resultado final de proteção do concreto.

Quando em contato com temperaturas superiores a 200°C, inicia-se a intumescência, resultando na expansão da camada de proteção em até 60 vezes a espessura seca original do material, promovendo a proteção térmica do substrato de concreto em temperaturas superiores a 1000°C (BRITTEZ *et al.*, 2019).

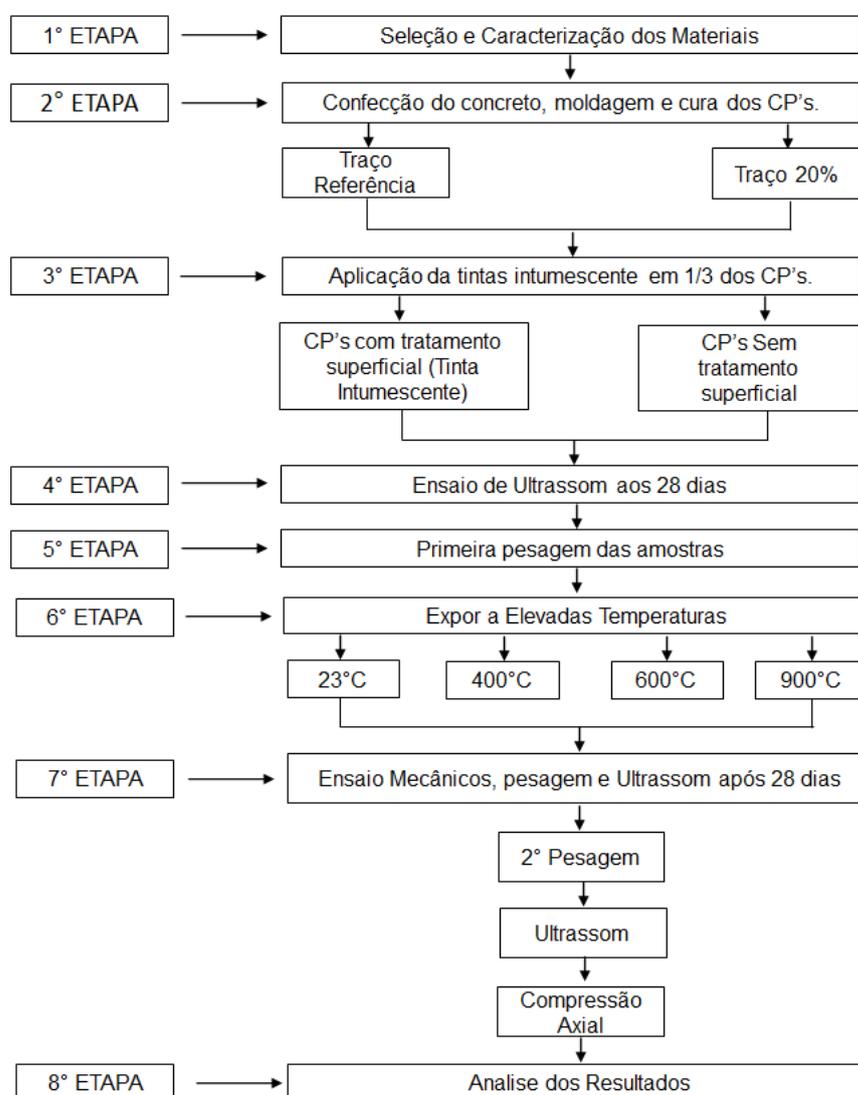
Em um programa experimental apresentado por Britez, Silva e Helene (2019) no XV *Congreso Latinoamericano de Patología de Construcción y XVII Congreso de Control de Calidad en la Construcción* no México, os mesmos mostraram o comparativo de estruturas de concreto armado exposto à simulação de incêndio. Para fins comparativos peças de concreto foram expostas simultaneamente, uma peça com a superfície com tinta intumescente aplicada e outra sem proteção. Após o experimento eles explica que o forno foi aberto para inspeção visual dos elementos. Foram observados lascamentos superficiais distribuídos uniformemente na face exposta ao fogo do elemento de referência, ou seja, o elemento sem a aplicação da proteção. Já no elemento em que a tinta foi aplicada, o concreto estava totalmente íntegro e preservado, não apresentando quaisquer sinais de um material tipicamente friável ou de armadura exposta.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção será apresentado os materiais e métodos que foram utilizados para que a pesquisa fosse desenvolvida e os objetivos fossem alcançados.

Os equipamentos e o espaço físico necessários para a execução do Programa Experimental foram disponibilizados pelo Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Alegrete/RS. A figura 10 apresenta o fluxograma do programa experimental que foi desenvolvido.

Figura 10 – Fluxograma do Programa Experimental.



Fonte: Elaboração própria.

A primeira etapa do trabalho corresponde a aquisição e caracterização dos materiais que foram utilizados para a produção dos concretos. A segunda etapa, apresenta a fase de confecção, moldagem e cura dos concretos. Na terceira etapa foram realizadas a pintura de um terço dos

corpos-de-prova (CP) com tinta intumescente, que serviu como uma barreira física de proteção contra o fogo. Na etapa 4 foram realizados os ensaios de ultrassom dos concretos antes da sua exposição a altas temperaturas. Na quinta etapa os concretos foram pesados, na sexta etapa parte das amostras foram submetidas as elevadas temperaturas e na sétima etapa, foram realizados os ensaios de ultrassom a segunda pesagem e os ensaios mecânicos. Por fim, na oitava etapa foi realizado a análise e as discussões dos resultados.

3.1 Materiais

Neste tópico estão apresentados os materiais que foram utilizados na confecção dos concretos de acordo com o programa experimental deste trabalho e as suas caracterizações.

3.1.1 Aglomerante

Como material aglomerante foi utilizado cimento Portland CP IV, com especificações da norma brasileira NBR 5736 (ABNT, 1991). Suas características químicas e físicas estão apresentadas na tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Características físicas e químicas do cimento Portland CP IV.

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	Unidades	Resultados	Exigências
Expansividade 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
3 dias	MPa	19,8	≥ 10 MPa
7 dias	MPa	24,3	≥ 20 MPa
28 dias	MPa	36,8	≥ 32 MPa

Fonte: Dados disponibilizados pelo fabricante.

3.1.2 Agregado natural miúdo

Para a confecção dos concretos foi utilizado como agregado miúdo, uma areia natural proveniente do rio Ibicuí, localizado no município de Manoel Viana/RS. A caracterização física deste agregado foi regida pelas normas brasileiras regulamentadoras citadas a seguir:

- NBR NM 248 (ABNT, 2003): Agregados – Determinação da composição granulométrica;
- NBR NM 52 (ABNT, 2009): Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente;
- NBR NM 45 (ABNT, 2006): Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios.

A tabela 2 apresenta a caracterização da areia natural proveniente do rio Ibicuí, município de Manoel Viana/RS.

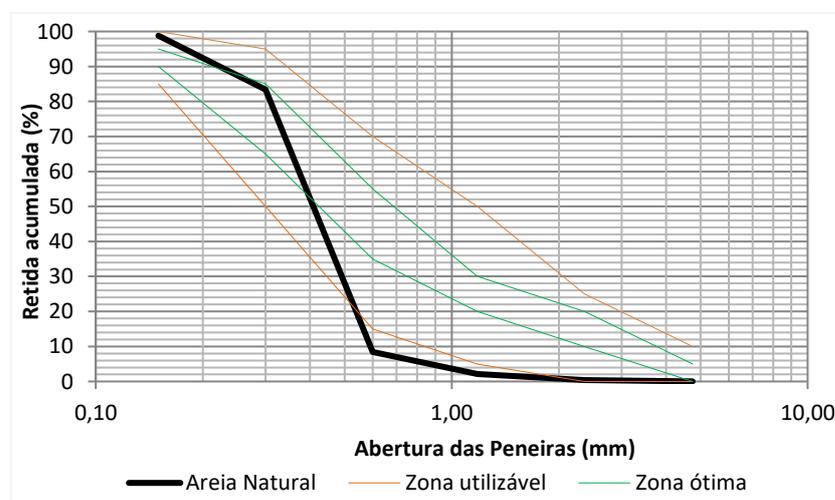
Tabela 2 – Características físicas da areia natural.

Descrição do Ensaio	Resultados
Massa específica	2,64 g/cm ³
Massa Unitária – Método C	1,62 g/cm ³
Massa Unitária – Método A	1,59 g/cm ³

Fonte: Elaboração própria.

Na figura 11 está apresentada a curva granulométrica da areia de natural e os limites normativos oriundos da NBR 7211 (ABNT, 2009). O agregado miúdo apresentou um diâmetro máximo de 1,19 mm e um modulo de finura de 1,93, valor que segundo Bauer (2008) caracteriza o agregado como areia fina por estar dentro dos limites de 1,71 a 2,85, estabelecidos pelo autor.

Figura 11 – Curva granulométrica da areia natural e os limites normativos.



Fonte: Elaboração própria.

Na figura 11 é possível verificar que na peneira 0,6mm a areia natural se encontra parcialmente fora dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), porém devido a disponibilidade do material na região, a areia foi usada na pesquisa.

3.1.3 Agregado miúdo reciclado de PET

Para a substituição parcial do agregado miúdo natural (em alguns traços) foi utilizado um agregado miúdo reciclado de PET (ou areia de PET) proveniente da empresa de reciclagem PETCEU/ Paraná-PR.

Apesar de ser um agregado de composição química diferente da areia natural, parte da sua caracterização para utilização no concreto foi embasada pelas mesmas normas técnicas Brasileiras do agregado miúdo, listada a seguir:

- 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.

A tabela 3 a seguir trás os resultados dos ensaios de caracterização da areia de PET disponibilizada pela empresa de reciclagem PETCEU/ Paraná-PR.

Tabela 3 – Características físicas da areia de PET.

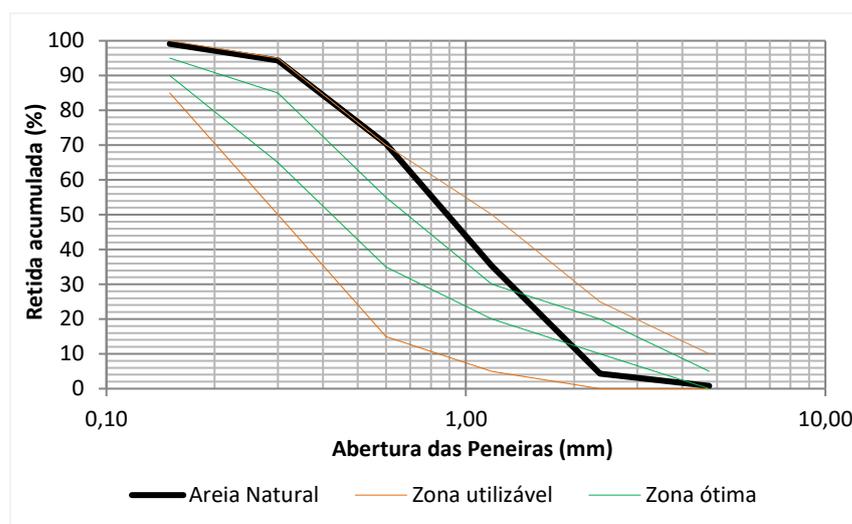
Descrição do Ensaio	Resultados
Massa Unitária – Método C	0,41 g/cm ³
Massa Unitária – Método A	0,35 g/cm ³

Fonte: Elaboração própria.

O agregado miúdo reciclado de PET (areia de PET) apresentou um diâmetro máximo de 2,36 mm e um modulo de finura de 3,06, valor que segundo Bauer (2008) caracteriza o agregado como areia média por estar dentro dos limites de 2,11 a 3,38.

Na figura 12 está apresentada a curva granulométrica da areia de PET e os limites normativos oriundos da NBR 7211 (ABNT, 2009).

Figura 12 – Curva granulométrica da areia de PET e os limites normativos.



Fonte: Elaboração própria.

Na figura 12 é possível verificar que a areia de PET se encontra dentro dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), viabilizando o seu uso na pesquisa.

3.1.4 Agregado graúdo

Como agregado graúdo foi utilizado brita basáltica advinda das jazidas da região de Alegrete/RS. A sua caracterização física foi realizada de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas técnicas brasileiras, listadas a seguir:

- 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.

A tabela 4 apresenta os resultados dos experimentos em laboratório realizados com o agregado graúdo.

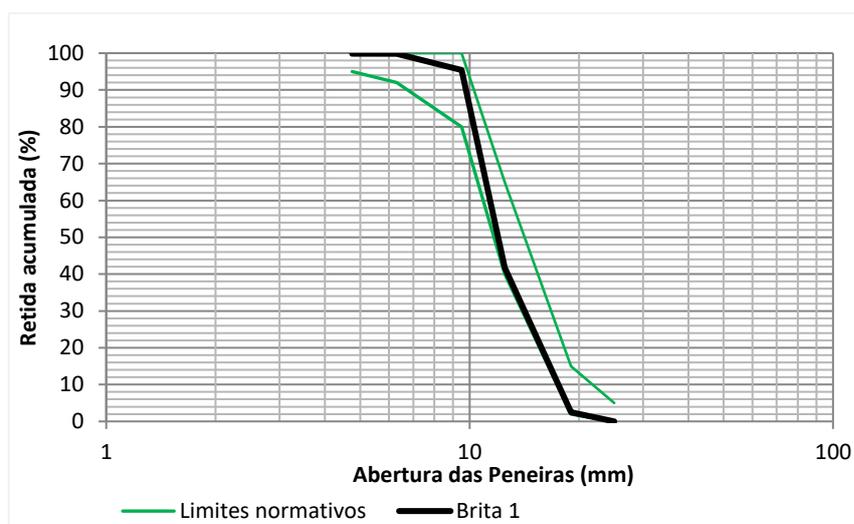
Tabela 4 – Características físicas brita basáltica.

Descrição do Ensaio	Resultados
Massa específica	2,73 g/cm ³
Massa Unitária – Método C	1,52 g/cm ³
Massa Unitária – Método A	1,47 g/cm ³

Fonte: Elaboração própria.

Na figura 13 está apresentada a curva granulométrica da brita basáltica e os limites normativos oriundos da NBR 7211 (ABNT, 2009). O agregado graúdo apresentou um diâmetro máximo de 19mm e um módulo de finura de 6,97.

Figura 13 – Curva granulométrica da areia natural e os limites normativos.



Fonte: Elaboração própria.

A figura 13 mostra que o agregado graúdo escolhido para o programa de pesquisa se encontra dentro dos limites utilizáveis estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

3.1.5 Água

Para a confecção dos concretos foi utilizada água proveniente da rede pública do município de Alegrete, fornecida pela CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento, que visto os tratamentos e controle sob o material antes da distribuição, a mesma se encontra isenta de materiais orgânicos e impurezas.

3.1.6 Aditivo

Para que o concreto atingisse a trabalhabilidade adequada foi utilizado o superplastificante Glenium 51 que tem como base química Éter Policarboxílico, assim, atingindo o valor do abatimento de cone exigido, que não foi alcançado devido à baixa relação de água/cimento da mistura ($a/c=0,45$), utilizada para que o concreto atingisse a resistência estrutural.

Inicialmente foi separado 0,4 gramas de aditivo que é o equivalente a 0,02% do Cimento Portland da mistura, porém o valor adequado do *Slump* (8 ± 2 cm) foi atingido antes do aproveitamento total do aditivo separado, sendo utilizado 0,14 gramas, 0,0077% do cimento da mistura. O mesmo valor foi mantido para ambos os traços da pesquisa para que houvesse um melhor comparativo entre os mesmos.

3.1.7 Tintas intumescentes

A tinta utilizada como barreira física foi a Maza Tinta Intumescente Branco, que segundo dados disponibilizados pelo próprio fabricante a intumescência acontece quando a temperatura ambiente atinge o valor de 200°C.

A aplicação da tinta nos corpos de prova do traço referência e do traço 20% PET seguiram o mesmo protocolo. Foi aplicado 2 demãos de tinta com intervalo de 6 horas entre as mesmas, seguido por um período de cura de 6 dias, recomendações advindas do fabricante.

3.2 Procedimento de dosagem, mistura e moldagem dos concretos

O desenvolvimento do trabalho ocorreu com a confecção de um traço padrão (traço de referência) e de um traço com PET, que se diferencia do traço padrão pela substituição parcial (em volume) de areia natural por areia de PET.

A partir do trabalho de Dacheri (2019) foi determinado o traço utilizado nesta pesquisa. A escolha do traço se justifica por atender o critério de 25MPa aos 28 dias (valor mínimo de acordo com as normas brasileiras para o concreto ser considerado estrutural) e também pelo fato de que a autora utilizou os mesmos materiais que serão empregados nesta pesquisa.

O traço padrão foi fixado em 1:4,5 (cimento: agregados - em massa), com consumo de cimento de 410 kg/m³ e relação água/cimento (a/c) de 0,45. A substituição do agregado miúdo por areia de PET foi realizada em volume no teor de 20%. Este teor de substituição foi escolhido a partir de trabalhos realizados por pesquisadores como Jardim (2017), Della Flora *et al.* (2018) e Dacheri (2019). Segundo os pesquisadores, até um teor de substituição de 20% em volume, a areia de PET não promove perda de desempenho mecânico significativa nos concretos. A tabela 5 apresenta os traços que foram utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Tabela 5- Tabela de traços 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	18,20	29,85	0	52,05	0,0077	0,45
20%PET	18,20	23,89	3,79	52,05	0,0077	0,45

Fonte: Autoria própria.

Como meio de controle de qualidade foi utilizado a NM 67 (ABNT, 1998), que recomenda o ensaio de Abatimento do Tronco de Cone, também conhecido como Slump Test. Para a presente pesquisa, o valor do abatimento do tronco de cone alcançado foi de 9 cm e 8 cm para o traço REF e o traço 20%PET, respectivamente.

3.2.1 Produção dos concretos e aplicação da barreira física

A produção dos concretos seguiu as orientações prestadas pela NBR 12655 (ABNT, 2015), utilizando uma betoneira de eixo inclinado. Os materiais usufruídos, cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água foram medidos em massa, enquanto que o agregado miúdo reciclado (areia de PET) foi medido em volume. Após a confecção dos traços foram moldados corpos de prova cilíndricos nas dimensões de $\phi 10 \times 20\text{cm}$ como mostra a figura 14, seguindo as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015).

Figura 14 – Concretagem do traço referência.



Fonte: Elaboração própria.

A quantidade de corpos de provas que foram moldados para a realização dos ensaios propostos está mostrado na tabela 6.

Tabela 6 – Quantitativo das amostras em função dos ensaios e das temperaturas de aquecimento.

Ensaio Proposto	Temperaturas de aquecimento			
	23°C	400°C	600°C	900°C
Ultrassom	3	6	6	6
Compressão Axial				
Total de CPs por Traço	21 corpos de prova (CPs)			

Fonte: Autoria própria

O processo de cura do concreto durou 57 dias devido aos problemas acarretados pela pandemia. Essa situação é justificada em função da proibição total de acesso aos laboratórios da Universidade Federal do Pampa quando o estudo já se encontrava em andamento.

As amostras permaneceram em cura submersa por um período de quatorze dias. Após este período, foram retiradas da cura e acondicionadas em ambiente de laboratório para secagem ao ar, por um período de trinta e seis dias.

Figura 15 – Corpos de prova em cura submersa (a) e em ambiente de laboratório (b).



Fonte: Autoria própria.

Após a finalização do processo de cura e liberação da entrada nos laboratórios, foi aplicado a tinta intumescente nos corpos de provas, como mostra a figura 16.

Figura 16 – Aplicação da tinta intumescente nos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo as orientações do próprio fabricante e de pesquisadores como Britez, Silva e Helene (2019) foram aplicadas 2 demãos de tinta em cada corpo de prova, com um intervalo de 6 horas entre cada demão. Após o período de cura de seis dias da última demão de tinta intumescente, os corpos de prova começaram a serem ensaiados às elevadas temperaturas.

3.2.2 Aquecimento dos concretos a diferentes temperaturas

Para atingir as elevadas temperaturas foi utilizado um forno elétrico da marca Sanchis (Figura 17), com capacidade de 120 litros, potência de 15kW e temperatura de alcance de 1250°C. O equipamento foi disponibilizado pelo Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete/RS.

Figura 17 - Forno elétrico Sanchis.



Fonte: Trabalho de conclusão de curso Eduarda Dacheri (2019).

As temperaturas de controle foram de 400°C, 600°C e 900°C, que são as temperaturas utilizadas no trabalho de Dacheri (2019). O aquecimento do forno foi de 1°C/min para cada corpo de prova, seguindo as recomendações da RILEM TC129 MHT (2000), que leva em consideração o diâmetro dos corpos de prova a serem aquecidos. Como a capacidade do forno elétrico é de seis corpos de prova, foi usado uma taxa de aquecimento de 6°C/min.

Segundo a NBR 14432 (ABNT, 2000) é necessário que as estruturas tenham o potencial de resistir no mínimo a 30 minutos em situação de incêndio, logo esse foi o tempo de exposição após o forno atingir a temperatura indicada para todos os corpos de prova, inclusive para os que possuem barreiras físicas. Após esse período, o forno foi desligado para o resfriamento gradual dos corpos-de-prova. Após um resfriamento preliminar, os corpos de prova foram retirados do forno e deixados em ambiente de laboratório até a sua temperatura se harmonizar com a do ambiente. Posteriormente, os concretos foram ensaiados quanto as suas propriedades mecânicas.

O aquecimento para os concretos do traço 20%PET foi realizado apenas até a temperatura de 600°C, por possíveis problemas apresentados pela mufla, com o estouro de corpos de prova a 600°C.

3.3 Propriedades mecânicas dos concretos no estado endurecido

Nesta seção, nos itens 3.3.1 ao 3.3.3 apresenta os ensaios de controle dos concretos no estado endurecido.

3.3.1 Ensaios de propagação de Onda-ultrassônica

O ensaio de propagação da onda-ultrassônica foi realizado em duas etapas distintas. Na primeira etapa, os corpos de provas foram submetidos ao ensaio logo após vencerem o processo de cura, aos 57 dias. Já a segunda etapa, aconteceu após os corpos de provas serem submetidos ao aquecimento em diferentes temperaturas e passarem por um resfriamento natural em ambiente de laboratório.

Para que o ensaio ocorresse da melhor forma, o mesmo foi guiado pela NBR 8802 (ABNT, 2019), que traz como parâmetro a utilização de aparelhos com transdutores acima de 20KHz e diâmetro de 50mm, como mostra a figura 18. Tais parâmetros foram aplicados para validação do ensaio e conseqüentemente da pesquisa.

Devido a problemas com o equipamento durante a pesquisa apenas parte dos corpos de prova passaram pelo ensaio, pois o equipamento apresentou falhas no início das medições do traço 20%PET, não tendo outro para o substituir disponível.

Figura 18 - Equipamento de propagação de Onda-ultrassônica.



Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Redução do peso do concreto.

Segundo Dias, *et al* (2019) torna significativa a perda de peso no concreto após a temperatura 400°C. Já o PET segundo a ABIPET, o material perde peso quando exposto a temperaturas superiores a 250°C devido a perda molecular que acontece.

Para verificar tais afirmações os corpos de prova foram pesados em dois momentos, antes e depois de serem submetidos as elevadas temperaturas, permitindo verificar a ação direta do fogo no peso do material, esse procedimento foi realizado para todos os corpos de prova, com e sem barreira física.

A pesagem foi realizada com a balança WLC 10/A2, a qual tem precisão de 0,1g disponibilizada pelo Laboratório de Materiais da Universidade Federal do Pampa.

3.3.3 Resistência à compressão axial

Antes da realização do ensaio, os corpos de prova foram submetidos a retificação da superfície para que as suas bases ficassem planas, como exige a NBR 5738 (ABNT 2015). Esse procedimento garantiu a qualidade no ensaio de compressão axial simples, que ocorreu de acordo com as prescrições oferecidas pelas NBR 5739 (ABNT 2007).

É importante salientar que o ensaio de compressão axial simples, foi realizado após as amostras terem sido expostas as elevadas temperaturas e terem passado pelo ensaio de ultrassom, conforme já exposto na Figura 10 (Fluxograma do Programa Experimental). Para as amostras submetidas a temperatura ambiente, o ensaio de compressão axial foi realizado após a realização do ensaio de ultrassom.

4 RESULTADOS

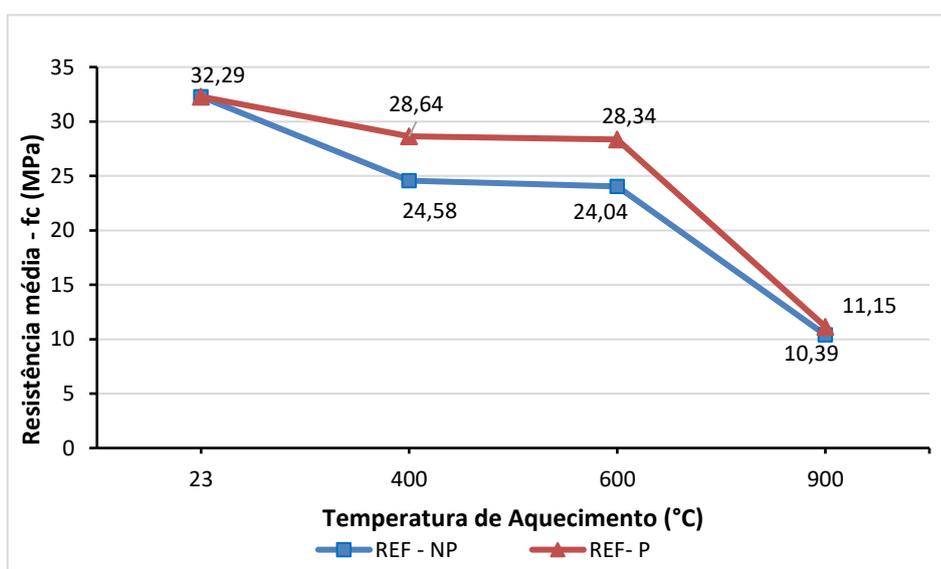
Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos em laboratório. A subseção 4.1 apresenta os dados referentes à resistência a compressão axial dos concretos. A subseção 4.2 expõem os resultados dos ensaios de ultrassom, realizado em parte dos corpos de prova da pesquisa. Na subseção 4.3 será apresentada a análise sobre a perda gradual de peso do concreto quando exposto a altas temperaturas, e por fim na subseção 4.4 é realizado uma análise visual dos corpos de prova após serem submetidos as elevadas temperaturas.

Os valores apresentados nesta seção são dados trabalhados para reduzir a discrepância entre os mesmos, os valores reais estão no apêndice desse trabalho.

4.1 Resistência a compressão axial

Para a análise do comportamento da resistência a compressão axial do concreto devido aplicação da barreira física, foram realizadas duas verificações distintas. Na primeira, foi considerado o comportamento mecânico de concretos convencionais (Referência) com e sem pintura intumescente submetidos a elevadas temperaturas (Figura 19), e a segunda, correspondeu a observação da ação da tinta intumescente sobre o traço com substituição de 20% de PET.

Figura 19 – Resistência média dos concretos em função da temperatura - Traço de Referência.



Fonte: Autoria própria.

A figura 19 mostra uma tendência de redução da resistência à compressão axial dos concretos com a elevação das temperaturas. Até a temperatura de 600°C os concretos com proteção física apresentaram os melhores resultados médios, porém acima desta temperatura

ocorreu uma intensificação da perda das propriedades mecânicas para ambas as amostras. Considerando a perda de resistência do concreto sem barreira física (REF- Não Pintado), observa-se que quando exposto a temperatura de 400°C, o traço referência perde em torno de 23,87% da sua resistência mecânica quando comparado a valores do mesmo traço a temperatura de 23°C. Para a exposição a 600°C, a perda passa a ser 25,55%, e a 900°C o valor da redução cai abruptamente para 67,82%. Em todas as temperaturas de exposição o concreto de referência sem barreira física (REF- Não Pintado) perde a característica de estrutural, devido ao fato de apresentar valores médios de resistência a compressão axial inferiores a 25MPa. Em contrapartida, o traço de referência com barreira física (REF- Pintado), além de manter a característica de concreto estrutural para as temperaturas de aquecimento de até 600°C, apresentou as menores variações na propriedade mecânica avaliada.

O principal intuito de retardadores térmicos como a tinta intumescente é segundo Oliveira (2017), reduzir o efeito do aumento da temperatura na resistência do concreto. Quando é observado o valor da resistência correspondente aos corpos de prova que foram protegidos com a tinta intumescente (Traço REF- Pintado, figura 19), verifica-se que a 400°C a perda de resistência do traço foi de 11,3%, valor igual a menos da metade da mesma temperatura para os corpos de prova que não foram protegidos. Em 600°C a perda foi de 12,23% e a 900°C próximo de 65,49%. Apesar de a 900°C a perda da resistência continua sendo alta, nas temperaturas anteriores os concretos se mantiveram com características estruturais, pois as resistências alcançadas foram superiores a 25MPa. Os resultados obtidos indicam existir vantagens no uso de proteção física em concretos em situação de incêndio.

A tabela 7 mostra o valor da perda de resistência mecânica para os concretos investigados em função da elevação da temperatura, quando comparados com as suas respectivas referências (resistência média à compressão axial em temperatura ambiente – 23°C).

Tabela 7 – Variação percentual da resistência mecânica de concretos após a exposição a elevadas temperaturas em relação às suas respectivas referências a temperatura ambiente.

Temperatura de Exposição dos concretos (°C)	Perdas de Resistência Mecânica (%)		Variação (%)
	Concretos sem barreira física	Concretos com barreira física	
400	23,87	11,30	12,57
600	25,55	12,23	13,32
900	67,83	65,49	2,34

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 7 indica existir uma probabilidade de que para o traço de referência a tinta intumescente promoveu uma proteção efetiva, minimizando as perdas da resistência mecânica

até a temperatura de 600°C. Após esta temperatura, a proteção da tinta intumescente parece deixar de ser eficiente. Para melhor análise, os resultados de resistência à compressão axial dos traços de referência com e sem barreira física passaram por um tratamento estatístico (ANOVA). Os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise de variância do traço de referência enfocando o efeito da temperatura e da barreira física na resistência à compressão axial.

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	5386,922	1	5386,922	2861,167	0,000000
Temperatura	651,803	2	325,901	173,097	0,000000
Barreira Física	27,694	1	27,694	14,709	0,004980
Erro	15,062	8	1,883		

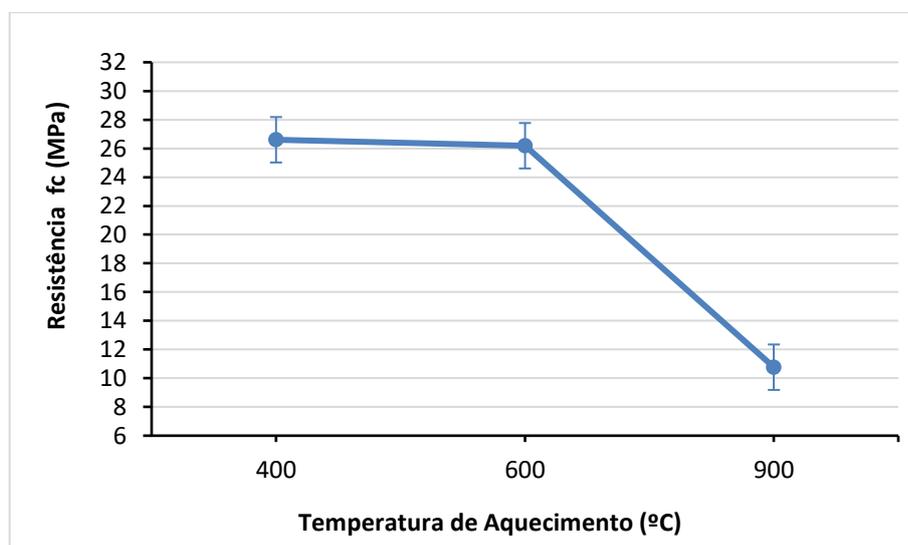
Onde: SQ –Soma dos Quadrados; GL- Grau de liberdade; MQ - Médias Quadradas; p- significância

Fonte: Autoria própria

A análise ANOVA (tabela 8) mostra que para o traço de referência a variação da temperatura e a aplicação da barreira física nos concretos de referência foram significativas ($p < 0,005$), ou seja, as variações destes fatores influenciaram a variável de resposta (resistência à compressão axial).

A Figura 20 e 21 mostram o efeito isolado da variação da temperatura e da aplicação da tinta intumescente na resistência à compressão axial dos concretos. Os gráficos foram obtidos a partir da análise ANOVA.

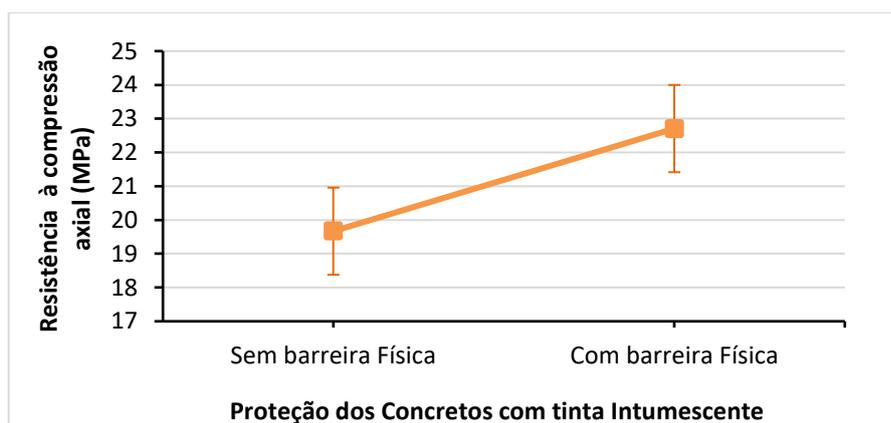
Figura 20 – Efeito isolado da variação da temperatura na resistência à compressão dos concretos - Traço de Referência.



Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 20 mostra que a variação do aquecimento reduziu significativamente as propriedades mecânicas do concreto. O gráfico da Figura 21 mostra o efeito isolado da aplicação da barreira física nas amostras sobre a resistência à compressão de concretos submetidos a elevadas temperaturas.

Figura 21 – Efeito isolado da aplicação ou não aplicação da barreira física na resistência à compressão dos concretos submetidos a elevadas temperaturas - Traço de Referência.

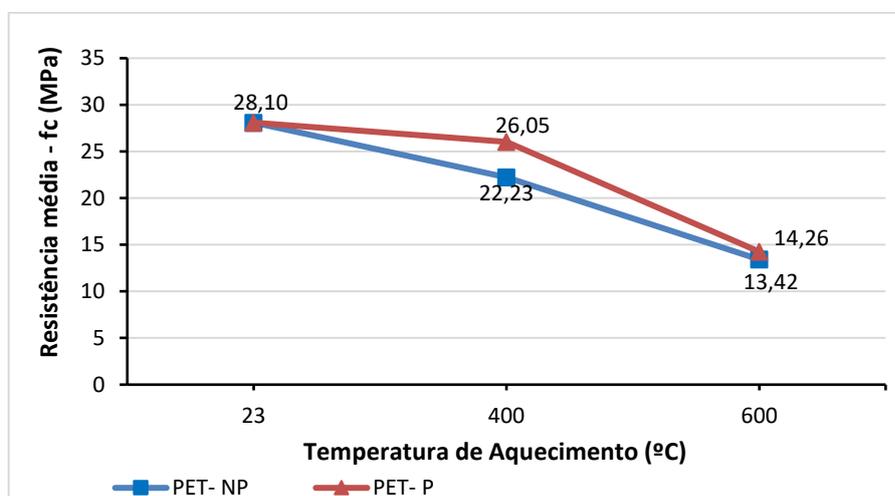


Fonte: Autoria própria.

A Figura 21 mostra que para os traços de referência a aplicação da barreira física promoveu uma eficiente proteção aos concretos, comprovando a tendência de comportamento anteriormente observada - de que a tinta intumescente promoveu uma proteção efetiva, minimizando as perdas mecânicas.

O desempenho dos corpos de prova que obtiveram a substituição parcial da areia natural por PET, pode ser verificado na figura 22.

Figura 22 - Resistência média dos concretos em função da temperatura - Traço de 20%PET.



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente comparando os dados da Figura 22 com a Figura 19 notasse que a incorporação de areia de PET nos concretos promoveu uma redução nas propriedades mecânicas à temperatura ambiente de aproximadamente 13%. Também pode ser observada a mesma tendência de comportamento de propriedades mecânicas já apresentada para os concretos referência, de redução da resistência à compressão axial dos concretos com a elevação das temperaturas. Para o traço 20%PET até a temperatura de 400°C os concretos com proteção física apresentaram os melhores resultados médios, porém acima desta temperatura ocorreu uma intensificação da perda das propriedades mecânicas para ambas as amostras. Nas temperaturas de 600°C as resistências já se apresentaram bastante reduzidas, o que contribuiu para a tomada de decisão de não realização da testagem a temperaturas mais elevadas (900°C).

Realizando um comparativo de resistência das amostras expostas a temperaturas elevadas com as amostras de referência (temperatura ambiente de 23°C), observa-se que os corpos de prova ao qual não foram aplicados a tinta intumescente (PET – não pintado) apresentaram uma redução de 20,89% a 400°C. Para a temperatura de 600°C a redução foi de 52,24%. Em contrapartida, os corpos de prova que receberam a barreira física (PET – Pintado) apresentaram uma redução da resistência de 7,29% e uma redução de 49,25%, para as amostras expostas a 400°C e 600°C, respectivamente.

Quando analisada a redução da perda de resistência entre os corpos de prova que foram protegidos e os que foram expostos sem proteção é possível notar que a tinta intumescente agiu de forma a minimizar a ação do fogo no concreto, pois a 400°C mesmo com um a adição de um material que tem alta vulnerabilidade ao fogo como o PET, as amostras protegidas apresentaram resistência que as caracterizam como concreto estrutural (>25MPa). Para temperaturas de exposição de 600°C o concreto apresentou uma baixa resistência, apesar do auxílio da barreira física. Neste caso, especificamente, acredita-se que a barreira física não conseguiu minimizar a temperatura de exposição, que provavelmente ultrapassou o ponto de fusão da areia de PET (260°C), promovendo a sua deterioração no interior do concreto e intensificado a perda de resistência mecânica.

A tabela 9 mostra a perda de resistência mecânica para os concretos investigados com incorporação de areia de PET em função da elevação da temperatura, quando comparados com as suas respectivas referências (resistência média à compressão axial em temperatura ambiente – 23°C).

Tabela 9 – Variação percentual da resistência mecânica de concretos com PET após exposição a elevadas temperaturas em relação às suas respectivas referências a temperatura ambiente.

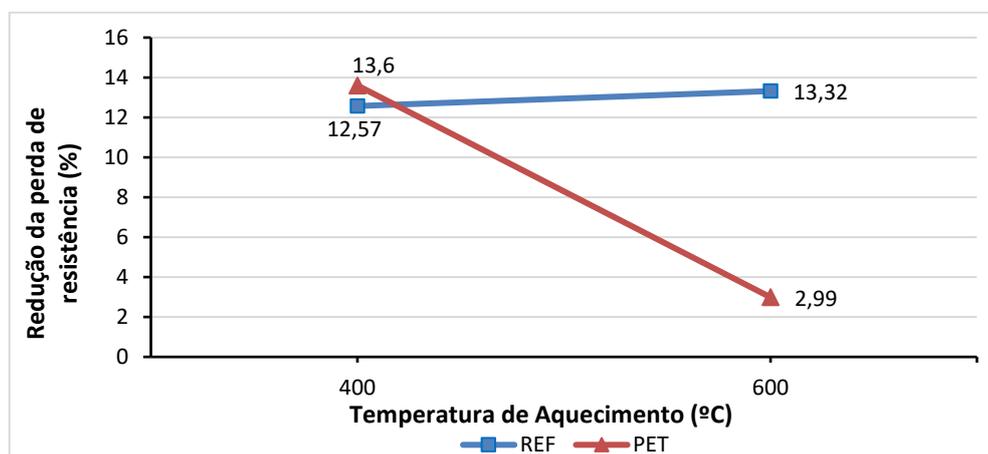
Temperatura de Exposição dos concretos (°C)	Perdas de Resistência Mecânica (%)		Variação (%)
	Concretos sem barreira física	Concretos com barreira física	
400	20,89	7,29	13,6
600	52,24	49,25	2,99
900	ND	ND	ND

ND – Não determinado

Fonte: Autoria própria.

A figura 23 apresenta um comparativo entre o traço REF e o traço 20%PET, mostrando a redução de resistência com a variação de temperatura (400°C → 600 °C).

Figura 23 - Resistencia do traço 20%PET após ser submetido as elevadas temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 mostra que a redução de resistência dos corpos de prova do traço referência e do traço 20%PET se mantiveram similares para a temperatura de 400°C, evidenciando um bom desempenho da tinta intumescente, porém para temperaturas superiores a diferença é discrepante. Pezzin (2007) alerta sobre a perda da resistência de concretos com PET quando expostos a temperaturas superiores a 250°C. Meneses (2011) relata que o PET presente nos concretos submetidos a temperaturas de 400°C passam a perder sua massa, resultando no aumento de vazios dentro do concreto, o que segundo o autor, influencia na redução da resistência. Os resultados apresentados e discutidos neste tópico corroboram com as considerações de Pezzin (2007) e Meneses (2011).

Para uma melhor complementação da análise dos resultados de resistência à compressão axial dos traços com PET foi realizado um tratamento estatístico (ANOVA). Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de variância do traço com PET enfocando o efeito da temperatura e da barreira física na resistência à compressão axial.

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	2883,822	1	2883,822	388,6462	0,000006
Temperatura	212,077	1	212,077	28,5811	0,003074
Barreira Física	10,835	1	10,835	1,4601	0,280933
Error	37,101	5	7,420		

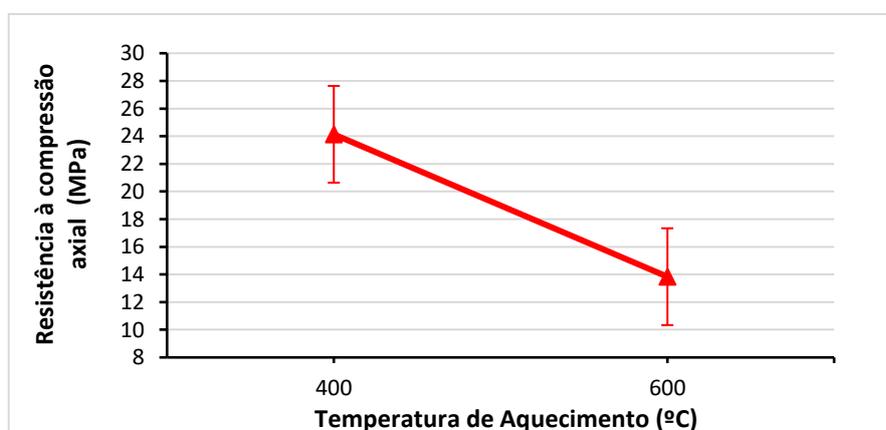
Onde: SQ –Soma dos Quadrados; GL- Grau de liberdade; MQ - Médias Quadradas; p- significância

Fonte: Autoria própria.

A análise ANOVA (tabela 10) mostra que para o traço com PET somente a variável “Temperatura” apresentou significância ($p < 0,005$), ou seja, essa variável influenciou nos resultados de resistência à compressão axial. A tabela 10 comprova também a tendência de comportamento já observada na análise preliminar dos resultados, de que a barreira física não conseguiu minimizar a temperatura de exposição de modo efetivo para os concretos com PET. Conforme já relatado, provavelmente em temperaturas de aquecimento acima de 200°C os concretos com PET ultrapassaram o ponto de fusão da areia de PET (260°C), o que contribuiu para a intensificação de sua deterioração interna, e a tinta intumescente não conseguiu agir de forma que reduzisse tal fenômeno.

A Figura 24 apresenta o efeito isolado da variável temperatura no comportamento mecânico dos concretos, obtido a partir da análise ANOVA.

Figura 24 – Efeito isolado da temperatura na resistência à compressão axial dos concretos - Traço com PET.



Fonte: Autoria própria.

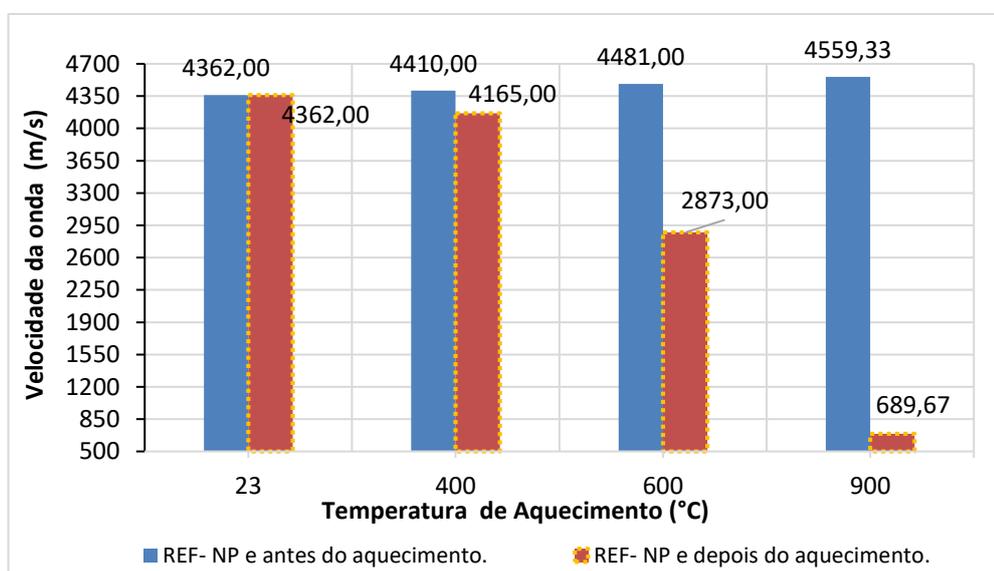
O gráfico da Figura 24 mostra que a variação do aquecimento reduziu significativamente as propriedades mecânicas dos concretos com areia de PET.

4.2 Propagação da Onda-Ultrassônica

A propagação da onda-ultrassônica no concreto permite analisar a homogeneidade do elemento sem a necessidade de um ensaio destrutivo. Inicialmente o objetivo do trabalho era utilizar esta técnica para a análise de todos os traços da pesquisa, porém quando o ensaio seria executado nos traços com a incorporação de areia de PET o equipamento apresentou problemas, e não pode ser consertado. Em função do exposto, serão apresentados e discutidos neste tópico os dados coletados para os traços de referência com e sem barreira física (pintura com tinta intumescente).

A determinação da velocidade de onda ultrassônica foi realizada nos corpos de prova em duas situações distintas (antes e após a exposição à elevadas temperaturas) para permitir uma avaliação mais precisa do impacto dessa variável na compacidade dos concretos. A Figura 25 mostra os valores de propagação de onda ultrassônica para os concretos de referência com e sem barreira física.

Figura 25 – Valores médios da velocidade de onda nos corpos de prova do traço REF sem barreira física antes e após aquecimento.



Fonte: Autoria própria.

A figura 25 mostra a redução da propagação da onda que acontece no concreto após ser aquecido, e como essa redução é proporcional ao aumento da temperatura, chegando a ser três vezes menor na temperatura de 900°C.

Ricon *et al.* (1998) e Whitehurst (1966), apresentam uma tabela que relaciona a velocidade da propagação da onda com a qualidade do concreto, tabela 9.

Tabela 11 – Classificação relacionando velocidade da onda e qualidade do concreto.

Velocidade de Onda Ultra-sônica (m/s)	Qualidade do Concreto
V > 4500	EXCELENTE
3500 < V < 4500	ÓTIMO
3000 < V < 3500	BOM
2000 < V < 3000	REGULAR
V < 2000	RUIM

Fonte: Ricon et al (1998) e Whitehurst (1966).

Analisando os resultados da Figura 22 e com base na tabela de Ricon et al (1998) e Whitehurst (1966) (Tabela 11), observa-se que antes de serem submetidos aos processos de aquecimento em distintas temperaturas, os corpos de prova foram separados em grupos e ensaiados quanto a propagação de onda ultrassônica. Os resultados médios mostraram que, antes do aquecimento, as amostras apresentaram classificação quanto a qualidade do concreto em “ótimo” e “excelente”. Após serem submetidos ao processo de aquecimento, os corpos de prova submetidos a temperatura de 400°C ainda apresentaram uma qualidade ótima (com velocidade de propagação de onda ultrassônica dentro dos parâmetros de 3500 < V < 4500). Porém, os concretos expostos a temperatura de 600°C apresentaram classificação quanto a sua qualidade como regular (2000 < V < 3000), caindo duas posições no ranking de classificação. Entre os concretos ensaiados, os corpos de prova submetidos ao aquecimento a 900°C apresentam o pior desempenho quanto a qualidade do concreto, e foram classificados como “ruim” (V < 2000).

A tabela 12 apresenta um comparativo entre a propagação da onda após a exposição a elevadas temperaturas e resistência axial das amostras.

Tabela 12 – Comparativo do efeito da temperatura com as propriedades mecânicas (57 dias) e a compacidade (qualidade) dos concretos.

Temperatura (°C)	Qualidade do concreto	Resistência à compressão Axial (MPa) – 28 dias
400	Ótima	24,58
600	Regular	24,04
900	Ruim	10,39

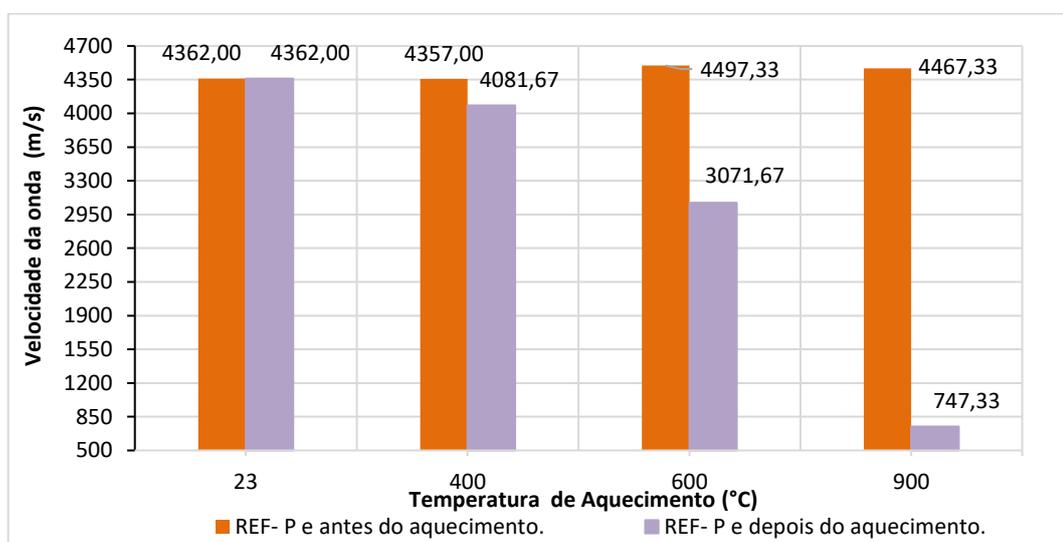
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 12 mostra uma relação direta entre as variáveis temperatura e resistência à compressão axial. Com o aumento da temperatura de exposição ao qual os concretos são submetidos, correm modificações na matriz cimentícia. Segundo Lima, E. (2007) e Mehta (2008) a matriz cimentícia sofre com o surgimento de microfissuras, a acentuada perda de peso,

a decomposição dos hidróxidos de cálcio e também a decomposição do C- S- H, quando submetido a elevadas temperaturas, logo, todas essas modificações irão implicar na alteração das propriedades mecânicas dos concretos, como observado na Tabela 12.

A Figura 26 apresenta os resultados dos ensaios de propagação de onda ultrassônica dos concretos de referência que receberam a barreira física. Os ensaios foram realizados antes e após o processo de aquecimento dos concretos em distintas temperaturas.

Figura 26 – Valores médios da velocidade de onda nos corpos de prova do traço REF com barreira física antes e após aquecimento.



Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados da Figura 26 e com base na tabela de Ricon *et al.* (1998) e Whitehurst (1966), apresentada na tabela 9, conclui-se que todas as amostras apresentam uma qualidade ótima antes do processo de aquecimento. Após o processo de aquecimento, os corpos de prova que foram expostos a temperatura de 400°C mantiveram a mesma classificação de qualidade obtida antes do processo de aquecimento (“ótimo”). Os corpos de prova submetidos as temperaturas de 600°C e 900°C foram classificados quanto a “qualidade do concreto” como “bom” e “ruim”, respectivamente.

Em uma análise preliminar conclui-se que houve uma contribuição da tinta para a minimização da degradação interna dos corpos de prova que foram expostos a elevadas temperaturas. Em uma análise mais minuciosa observa-se que para as temperaturas de exposição de 600°C, as amostras sem proteção física foram classificadas - quanto a qualidade do concreto - como “regular”, enquanto que as amostras com barreira física (pintura intumescente) foram classificadas - quanto a qualidade do concreto - como “boa”. Para os concretos com e sem

barreira física, submetidos a temperatura de 900°C a classificação não foi alterada, mantendo-se (em ambos os casos) na categoria “ruim”.

Apesar de pequena, a contribuição da barreira física (tinta intumescente) nos casos apresentados foi comprovada. Para as temperaturas avaliadas (400°C, 600°C e 900°) houve uma redução da degradação interna do concreto, conforme mostrada na tabela 11 pelo aumento da propagação da onda ultrassônica nas amostras com proteção física.

Tabela 13 – Comparativo do efeito da temperatura com as propriedades mecânicas (57 dias) e a compacidade (qualidade) dos concretos.

Temperatura (°C)	Qualidade do concreto sem proteção física	Qualidade do concreto sem proteção física	Aumento da propagação da onda (%)
400	Ótima	Ótima	-
600	Regular	Boa	7%
900	Ruim	Ruim	8%

Fonte: Autoria própria.

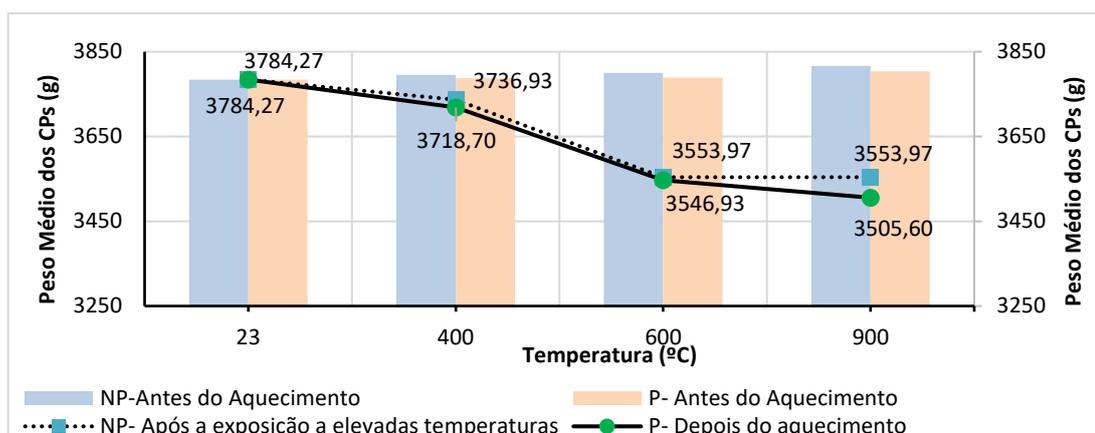
As informações da Tabela 13 indicam uma tendência de comportamento, de que quanto maior a degradação potencial devido a temperatura a qual o concreto está sendo exposto, maior será a contribuição da tinta para que a degradação interna do concreto seja reduzida. No entanto, para validar essa hipótese seriam necessários ensaios complementares, como os microestruturais (microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários), por exemplo.

4.3 Efeito de elevadas temperaturas no peso dos concretos

A exposição do concreto a elevadas temperaturas gera na matriz cimentícia diversas variações nas suas propriedades. Dias, *et al* (2019), observou que umas das mudanças é a perda de peso que acontece na matriz cimentícia. Lima, R. (2005), aponta que no processo de perda de peso com o aumento da temperatura, é possível destacar três momentos, o primeiro atribuído a desidratação do concreto com ênfase na desidratação progressiva no C -H – S, o segundo é uma perda abrupta que ocorre devido a desidratação da portlandita e o terceiro momento que acontece apenas em temperaturas altamente elevadas que é quando há a descarbonatação da calcita.

Para os corpos de prova testados nesta pesquisa a perda de peso para o traço REF está mostrado na figura 27.

Figura 27 – Perda de peso média dos corpos de prova do traço REF.

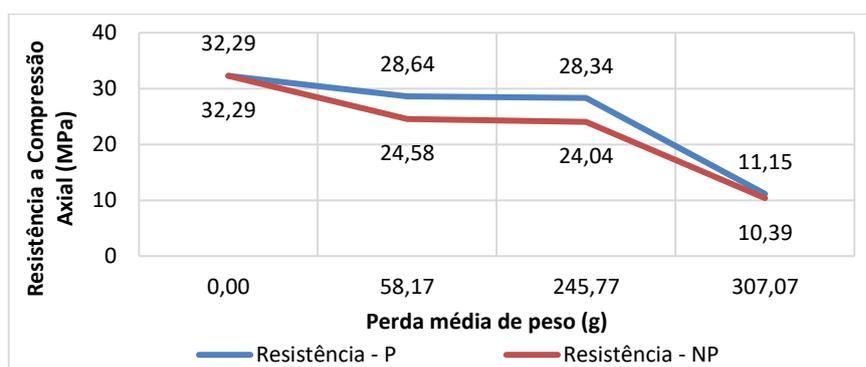


Fonte: Autoria própria.

Como é possível analisar os dados dos concretos do traço referência mostrado na figura 27, o percentual de perda de peso nas amostras fica cada vez maior com o aumento da temperatura de aquecimento. Dias, *et al* (2019), aponta sobre uma perda abrupta que acontece após os 400°C, tal afirmação é reforçada nos dados da pesquisa, pois a 400°C acontece uma perda média de 58,17g para as amostras não pintadas e 68,10g para os corpos de prova com proteção física, já à 600°C essa perda média para as amostras não pintadas passa a ser 245,71g e para as pintadas 241,9g, em ambos os casos o aumento percentual da perda após a temperatura de 400°C é de aproximadamente 400%, influenciando diferentemente na perda de resistência axial do concreto já que a perda de peso é um reflexo das mudanças microestruturais que acontece na matriz cimentícia como foi afirmado por Morales (2011), as mudanças microestruturais influenciam diretamente na resistência axial do concreto.

Para melhor visualização da reação entre a resistência a compressão axial do concreto e a perda de peso, a figura 28 apresenta um gráfico que as relaciona.

Figura 28 – Perda média de peso dos corpos de prova do traço REF comparado com a resistência axial.

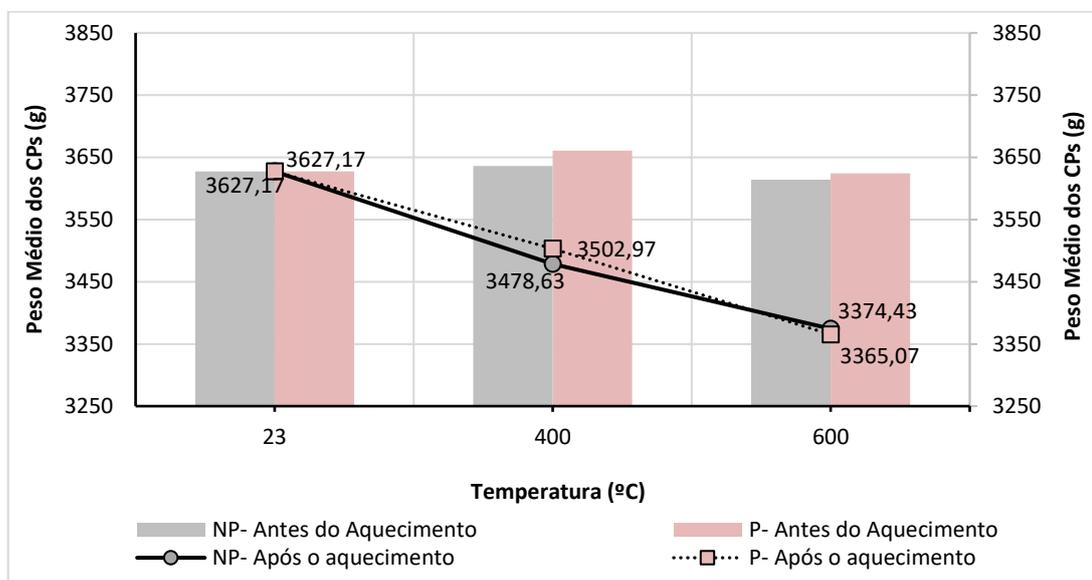


Fonte: Autoria própria.

Com o aumento da perda de peso, há uma redução da resistência, logo nas maiores temperaturas onde ocorre os maiores valores de perda de peso, se encontram as menores resistências, pois há diversos processos microestruturais que aconteceram no concreto durante o aumento progressivo da temperatura, mudanças essas que refletem diretamente no desempenho do concreto nas ultimas temperaturas de pesquisa.

Para os corpos de prova com PET (traço 20%PET), testados nesta pesquisa, a perda de peso está mostrada na figura 29.

Figura 29 – Perda de peso média dos corpos de prova do traço 20%PET.

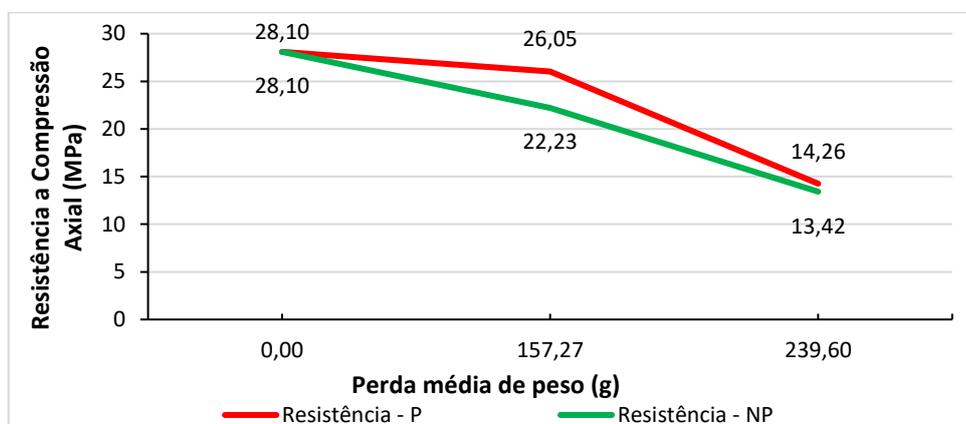


Fonte: Autoria própria.

O PET é um material que quando exposto a elevadas temperaturas apresenta uma baixa resistência a mudanças causadas pelo calor, ABIPET (2011), salienta que a degradação térmica que acontece no PET causa redução do peso molecular do material. Logo matrizes cimentícias com adição de PET, sofrem a influência dessa característica na sua perda de peso quando comparada a matrizes cimentícias com composições tradicionais. Como pode ser analisado na figura 29, os corpos de prova com substituição parcial de PET, já apresentam uma significativa perda de peso com a variação de temperatura de exposição de 23°C para 400°C, o que não ocorreu na mesma variação de temperatura para o traço referência.

Com materiais na sua composição mais sensíveis a mudança de temperatura consequentemente influencia na resistência a compressão dessas amostras, pois ocorre a quebra molecular no agregado de PET que acaba relacionando a perda de peso e de resistência do concreto como mostra a figura 30.

Figura 30 – Perda média de peso dos corpos de prova do traço 20%PET comparado com a resistência axial.



Fonte: Autoria própria.

Seguindo a mesma tendência que os dados do traço referência, com o aumento da temperatura e da perda de peso a resistência tende a reduzir. Os valores são agravados devido a presença do PET, que por suas características térmicas amplificaram as mudanças microestruturais que aconteceram nos corpos de prova.

Para ambos, a perda de peso é inversamente proporcional a resistência, pois quando maior a perda de peso menor é a resistência que essas amostras apresentaram. Também é possível analisar que a tinta intumescente parece não influenciar na perda de peso, pois apesar dos corpos de prova pintados apresentarem uma maior resistência a curva que o caracteriza em relação da perda de peso com a resistência é similar para amostras pintadas e não pintadas, isso ocorre para ambos os traços como pode ser vista na figura 26 e figura 27, indicando em cada temperatura de pesquisa a perda de peso foi igualmente proporcional para as amostras protegidas e não protegidas.

Para uma melhor complementação da análise dos resultados da variação de peso das amostras de Referência e com PET (em função da variação da temperatura de aquecimento) foi realizado um tratamento estatístico (ANOVA). Os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Análise de variância dos traços Referência e com PET enfocando o efeito da temperatura e da barreira física na perda de peso dos concretos.

ANOVA	SQ	GL	MQ	Teste F	p
Intercepto	319952246	1	319952246	49390,08	0,000000
Temperatura Aquecimento	84974	1	84974	13,12	0,001700
Barreira Física	1	1	1	0,00	0,988270
Incorporação de PET	183609	1	183609	28,34	0,000033

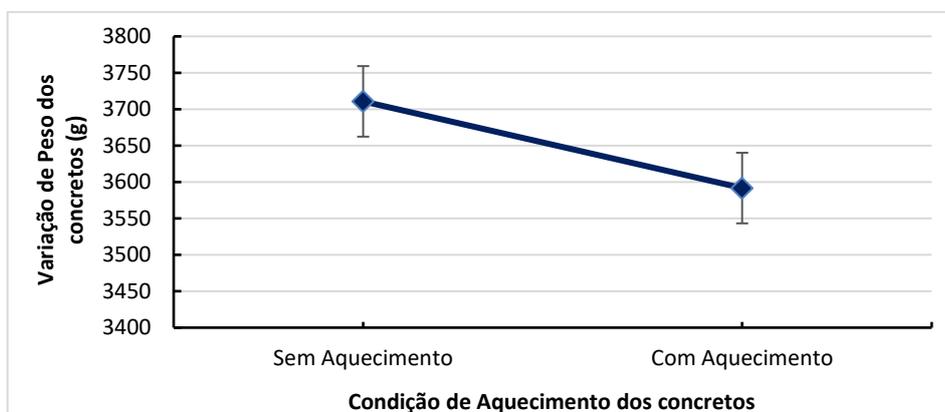
Onde: SQ – Soma dos Quadrados; GL- Grau de liberdade; MQ - Médias Quadradas; p- significância

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da ANOVA (Tabela 14) mostram que as variáveis “Temperatura de aquecimento” e “incorporação de PET” contribuíram de maneira significativa na redução de peso dos concretos. A variável “barreira física” (pintura com tinta intumescente) não se mostrou significativa, corroborando com os resultados já observados na análise preliminar de dados.

As Figuras 31 e 32 apresentam o comportamento isolado das variáveis “Aquecimento” e “Incorporação de PET” na propriedade avaliada (perda de peso dos concretos). Os gráficos foram obtidos a partir da análise ANOVA.

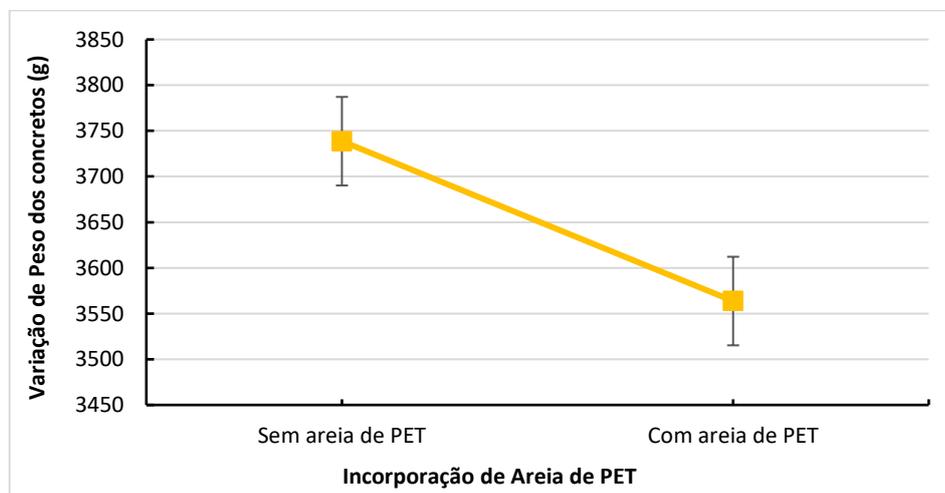
Figura 31 – Efeito isolado da temperatura na perda de peso dos concretos.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 31 mostra o comportamento isolado da variável “Aquecimento” na propriedade avaliada (perda de peso dos concretos). Conforme já observado, a análise ANOVA confirma que ocorre uma variação significativa no peso dos concretos com a variação das temperaturas de aquecimento.

Figura 32 – Efeito isolado do na perda de peso dos concretos com e sem incorporação de areia de PET.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 32 mostra o comportamento isolado da variável “Incorporação de areia de PET” na propriedade avaliada (perda de peso dos concretos). Conforme já observado e discutido, a análise ANOVA confirma que ocorre uma variação mais significativa no peso dos concretos que possuem a areia de PET

4.4 Análise Visual dos Concretos submetidos a elevadas temperaturas

Neste tópico serão apresentadas algumas considerações sobre o aspecto visual de alguns dos concretos submetidos a elevadas temperaturas e que apresentaram algumas peculiaridades.

A Figura 33 apresenta o aspecto interno de um concreto com 20% de areia de PET e submetido a uma temperatura de 600° C.

Figura 33 – Aspecto interno de um concreto com substituição parcial de areia natural por PET (traço 20% PET) após ser exposto a uma temperatura de 600°C.



Fonte: Autoria própria.

Os círculos em vermelhos na figura 33, destacam alguns lugares dentro do concreto que possivelmente estavam o PET, e que em função da temperatura de exposição do concreto, se tornaram vazios.- Meneses (2011) afirma que após o aquecimento de concretos com PET em elevadas temperaturas (acima de 250°C) ocorre uma perda da massa do PET (em função da temperatura do concreto exceder a temperatura de fusão deste material). Segundo o autor, essa perda de massa em um material com dimensões tão pequenas - como a areia de PET- faz com que após o aquecimento, esse material tenda a desaparecer de dentro do concreto, aumentando o índice de vazios proporcionalmente à medida que a temperatura de exposição vai se elevando.

A figura 34 mostra em outra perspectiva o aspecto da superfície do concreto com agregado de PET, após o aquecimento.

Figura 34 – Concreto do traço 20%PET com barreira física após ser exposto a 600°C.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34 é possível identificar uma quantidade maior de PET na superfície do corpo de prova. Esta situação ocorreu porque no processo de aquecimento, o PET distribuído próximo da superfície do concreto, tende a sair pelos vazios que estão sendo formados, e acabam se acumulando na superfície. Darechi (2019), levanta a possibilidade de que possam ser impurezas presentes na areia de PET, proveniente das tampas de garrafas plásticas, que são compostas de polietileno, e então derreteram e vazaram pelos poros.

A Figura 35 apresenta o aspecto de algumas amostras que receberam proteção física (tinta intumescente) e que foram submetidas a um aquecimento de 400°C.

Figura 35 – Concreto do traço 20%PET após ser exposto a 400°C.



Fonte: Autoria própria.

A tinta intumescente após se aquecida nas temperaturas da pesquisa, atribuiu a alguns corpos de prova uma coloração escura, como mostra a figura 35. Outra consideração a respeito desta figura é que as bases das amostras apresentaram uma coloração diferente do restante do

corpo de prova, indicando a possibilidade de a queima não ocorrer de forma uniforme na Mufla. Fato que pode ter influenciado nos resultados das propriedades mecânicas.

Figura 36 – Concreto do traço REF após ser exposto a 600°C.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 apresenta o aspecto de um corpo de prova do traço REF exposto a uma temperatura de aquecimento de 600°C. Observou-se que para esta temperatura, as amostras mantiveram a coloração escura após a finalização do processo. Além disso, devido à alta temperatura de queima, a tinta intumescente expandiu e começou a se desprender do corpo de prova. Também foi possível observar que a expansão da tinta intumescente não ocorreu de maneira uniforme em toda a amostra, uma vez que o topo do corpo de prova apresentou quase toda a tinta fragmentada, enquanto que a base apresentou pouca fragmentação. As características da tinta intumescente após a exposição a elevadas temperaturas, indica uma probabilidade da temperatura no interior da mufla não estar sendo distribuída de maneira uniforme, conforme já informado.

A Figura 37 apresenta o aspecto de algumas amostras de concreto após a exposição a temperatura de 900°C. Diferente do observado para as demais temperaturas, os corpos de prova expostos a 900°C não apresentaram uma coloração escura.

Figura 37 – Concreto do traço REF após ser exposto a 900°C.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 37 mostra que os corpos de prova que receberam barreira física (localizados na frente na imagem). Após o aquecimento a 900°C, as amostras protegidas com a tinta apresentaram a reação química da intumescência e adquiriram uma coloração esverdeada. Após o resfriamento, a tonalidade verde reduziu ficando mais voltada para o branco.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho avaliou o desempenho mecânico de concretos distintos, um com incorporação parcial de 20% de PET com e sem proteção de barreira física (tinta intumescente) em comparação a um concreto de referência (com e sem proteção de barreira física) expostos à uma situação de incêndio (elevadas temperaturas).

Na avaliação da propriedade de resistência a compressão axial, as amostras do traço de referência que receberam a proteção física (tinta intumescente) apresentaram um melhor desempenho mecânico em relação as amostras do mesmo traço sem a proteção para as temperaturas estudadas. O mesmo comportamento foi observado para os traços com adição parcial de PET para temperaturas até 400°C; apesar destes concretos apresentarem uma menor resistência em relação ao traço de referência, ainda mantiveram a característica de concreto estrutural (25MPa). Porém, para temperaturas superiores a 400°C, a tinta intumescente não foi eficiente o suficiente a ponto de manter o concreto com PET em boas condições estruturais. Acredita-se que para a temperatura de 600°C a barreira física não minimizou suficiente a ação do calor no interior dos corpos de prova, promovendo a degradação do PET (alcançada a 260°C) e perdas das propriedades mecânicas desses concretos.

Quanto ao ensaio de propagação da onda ultrassônica no traço de referência, foi observado que a exposição dos concretos até 400°C indicaram uma boa e ótima condição interna das amostras. No entanto, com o aumento da temperatura, os resultados mostraram uma perda progressiva da qualidade dos concretos, mesmo para aqueles protegidos com a barreira física. Conclui-se que a tinta intumescente auxiliou para que a degradação interna nas amostras ocorresse de forma mais lenta, uma vez que os corpos de provas pintados (com barreira física) e expostos a 600°C apresentaram boa qualidade, e os corpos de prova não pintados, qualidade regular, segundo a tabela de classificação de Ricon *et al.* (1998) e Whitehurst (1966).

Em relação a perda de peso dos corpos de prova, a análise de variância (ANOVA), indicou que a incorporação de PET e o aumento de temperatura tiveram um papel importante nessa propriedade, o que justifica o fato dos corpos de prova com PET apresentaram uma maior perda de peso com o aumento gradativo da temperatura. A análise de variância também indicou que a variável proteção física (pintura intumescente) não se mostrou significativa para essa variável (perda de peso). Graficamente esse comportamento já havia sido identificado, pois para ambos os traços (referência e com PET) a curva que caracteriza a perda de peso dos concretos protegidos se comportou de forma similar à curva dos concretos não protegidos.

Em função do exposto, conclui-se que a utilização do PET como agregado miúdo para concretos pode ser viável quando considerado apenas as propriedades mecânicas a temperatura ambiente. No entanto, não é viável do ponto de vista de segurança da estrutura, principalmente se a estrutura for acometida por um incêndio. Apesar do PET auxiliar na preservação do meio ambiente, não é plausível projetar uma estrutura sem cogitar os possíveis incidentes que podem ocorrer durante a sua vida útil, como o caso de um incêndio. Apesar da barreira física (tinta intumescente) ter se mostrado de certa forma eficiente, minimizando os danos do concreto submetido à elevadas temperaturas, e contribuindo para a manutenção da resistência até determinadas temperaturas, o seu uso como proteção física para concretos com incorporação de PET deve ser visto com cautela.

5.1 Sugestões de trabalhos futuros

Os resultados obtidos com essa pesquisa e observações feitas durante o processo experimental, levantam possibilidades de outros temas para debate, indicados abaixo.

- Avaliação das propriedades mecânicas do concreto com adição parcial de PET expostos a temperaturas intermediárias entre 400°C e 600°C, para verificar essa faixa de temperatura em que acontece a queda brusca das propriedades;
- Aplicação da tinta intumescente outros concretos confeccionados com agregados não tradicionais, afim de analisar se há melhor desempenho da tinta em concretos com agregados não tradicionais que não são tão sensíveis a mudanças de temperatura;
- Simular paredes de concreto com adição parcial de PET protegida com a tinta intumescente, para verificar se há alteração dos dados comparados aos coletados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

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 DA INDÚSTRIA DO PET. **A fabricação das pré formas de PET**. São Paulo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 1991.

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

_____. **NBR 144328: 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 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2004.

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

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

_____. **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.

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

AITA, José C. L.; PEIXOTO, Nirvan H. **Prevenção e Combate a Sinistros.** Rio Grande do Sul: Rede e-Tec Brasil, 2012. 15 p.

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

BEZERRA, Luciano André Cruz. **Análise do Desempenho Térmico de Sistema Construtivo de Concreto com EPS Como Agregado Graúdo.** 2003. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Natal, 2003.

BRITEZ, C.; SILVA V. P.; HELENE P. **Contribuição para avaliação do desempenho de revestimentos contrafogo em elementos de concreto armado submetido a temperaturas elevadas.** XV Congresso Latinoamericano de Patologia de Construcción. v. 22, n. 2, p. 4-7, 2019.

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

CALDAS, Rodrigo Barreto. **Análise numérica de estruturas de aço, concreto e mista em situações de incêndio.** 2008. Dissertação de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Pontifícia Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Belo Horizonte, 2008.

DACHERI, Maria Eduarda Fantin. **Avaliação do comportamento de concreto com Politereftalato de etileno submetido a elevadas temperaturas**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2019.

DACHERI, M. E. F.; VENQUIARUTO S. D.; OLIVEIRA M. J. D. **Concreto com Politereftalato de etileno: avaliação do comportamento sob elevadas temperaturas**. Congresso Brasileiro do Concreto. v. 22, n. 2, p. 5-13, 2020.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO F. A.; RAFAEL, M. F. C.; CABRAL, A. E. B.; **Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas**. Revista Matéria. v. 25, n. 2, 2020.

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.

DELLA FLORA, Diovana et al. **Influência do teor de PET na absorção de água por capilaridade em concretos**. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 9, n. 3, 2018.

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

FERREIRA, Luis Carlos. **Incêndio no Grande Avenida deixa 17 mortos**. Folha de São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://f5.folha.uol.com.br/saiunonp/2015/01/1574606-incendio-no-grande-avenida-deixa-17-mortos.shtml>>. Acesso em: 10 de setembro 2020.

G1, SP. **Incêndio e desabamento do prédio no Largo do Paissadu completam um ano**. G1, 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: 20 de novembro 2020.

Hendges, Antonio S. **Brasil se destaca no reuso do PET**. Revista Cidadania & Meio Ambiente. Ano IX, número 52, 2014. Disponível em <<https://www.ecodebate.com.br/2014/02/11/producao-utilizacao-descarte-e-reciclagem-do-pet-no-brasil-artigo-de-antonio-silvio-hendges/>>. Acesso em: 20 de setembro 2020.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL. **O Brasil é o 3º país com o maior número de mortes por incêndio.** São Paulo, 2015.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1:1999: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements.** 1999.

JARDIM, Rosiéli Ribeiro. **Estudo da viabilidade da substituição parcial do agregado miúdo por agregado miúdo reciclado de pet em concretos convencionais.** Alegrete, 2016.

JORDÃO, Vinicius. **Relembre 10 incêndios que marcaram a história do Brasil.** Correio Braziliense, 2019. Disponível em: <<https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/brasil/2019/02/08/interna-brasil,736353/relembre-dez-incendios-que-marcaram-a-historia-do-brasil.shtml>>. Acesso em: 10 de setembro 2020.

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

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

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

MORALES, G.; CAMPOS. A.; FAGARELLO, A. M. P. **Ação do fogo sobre os componentes do concreto.** In: SEMINA: CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS, Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 32, n. 1, p. 47-55, Londrina, 2011.

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

MENESES, Ilzenete Andrade. **Avaliação de concreto com adição parcial de fibras de PET submetidos a altas temperaturas.** 2011. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio Grande do Norte, 2011.

MEHTA, Povindar, Kumar.; MONTEIRO, Paulo José. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1994. 273 p.

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

MORAES, Nilo. **O incêndio no edifício das Lojas Renner**. Almanaque Cultural Brasileiro, 2019. Disponível em: <<https://almanaquenilomoraes.blogspot.com/2019/12/o-incendio-no-edificio-das-lojas-renner.html>>. Acesso em: 10 de setembro 2020.

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

OLIVEIRA, R. B. R. S. et al. **Tinta intumescente como revestimento de proteção ao fogo**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 10, n. 1, p. 233-237, 2017.

PINTURAS INTUMESCENTES. **Pintura Intumescente**. Pintura Intumescente, 2019. Disponível em: <<http://www.pinturaintumescente.com.br/>>. Acesso em: 26 de novembro 2020.

PEZZIN, A.P.T., **Reciclagem química de embalagens de PET pós-consumo: Síntese de novos co-polímeros biodegradáveis**, Notas de aula, UNIVILLE, Joinville, SC, Brasil, 2017.

PHAN, L. T.; CARINO, N. J.; **Rewiew of mechanical properties of HSC at elevated temperature**. Journal of Materials in civil Engineering, fevereiro, 1998, p. 58-64, 1998.

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, 2004.

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.

SPÓSITO, F. A.; HIGUTI, F. T.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L.; MELGES, J. L. P.; ASSUNÇÃO, C. C.; BORTOLETTO, M.; SILVA, R. G.; FIORITI, C. F. **Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime**. Journal of Building Engineering. fevereiro, 2020.

VELLAMO, Engenharia e Projetos. **Os 12 maiores incêndios do Brasil: Existem algo em comum?** Vellamo Engenharia e Projetos, 2015. Disponível em: <<https://www.vellamo.eng.br/noticias/os-maiores-incendios-do-brasil>>. Acesso em: 10 de setembro 2020.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Peso das amostras de ambos os traços.

Tratamento CPs	Dados TCC II - Traço REFERÊNCIA			
	23°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
NÃO PINTADOS	1	3792,30	3792,30	0
	2	3794,70	3794,70	0
	3	3765,80	3765,80	0
	MÉDIA	3784,27	3784,27	0,00

Tratamento CPs	Dados TCC II - Traço com PET			
	23°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
NÃO PINTADOS	1	3607,50	3607,50	0
	2	3601,60	3601,60	0
	3	3672,40	3672,40	0
	MÉDIA	3627,17	3627,17	0,00

Tratamento CPs	400°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
	NÃO PINTADOS	1	3811,5	3737,5
2		3769,20	3725,20	44
3		3804,60	3748,10	56,5
	MÉDIA	3795,10	3736,93	58,17
PINTADOS	4	3784,00	3699,40	84,60
	5	3805,60	3755,70	49,90
	6	3770,80	3701,00	69,80
	MÉDIA	3786,80	3718,70	68,10

Tratamento CPs	400°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
	NÃO PINTADOS	1	3652,6	3504
2		3628,90	3465,00	163,9
3		3626,20	3466,90	159,3
	MÉDIA	3635,90	3478,63	157,27
PINTADOS	4	3638,80	3477,90	160,90
	5	3639,80	3479,90	159,90
	6	3704,20	3551,10	153,10
	MÉDIA	3660,93	3502,97	157,97

Tratamento CPs	600°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
	NÃO PINTADOS	1	3786,90	3521,20
2		3836,00	3602,50	233,50
3		3776,30	3538,20	238,10
	MÉDIA	3799,73	3553,97	245,77
PINTADOS	4	3775,50	3545,30	230,20
	5	3798,20	3569,80	228,40
	6	3793,00	3525,70	267,30
	MÉDIA	3788,90	3546,93	241,97

Tratamento CPs	600°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
	NÃO PINTADOS	1	3616,00	3377,30
2		3624,10	3399,50	224,60
3		3602,00	3346,50	255,50
	MÉDIA	3614,03	3374,43	239,60
PINTADOS	4	3615,40	3359,00	256,40
	5	3620,80	3366,60	254,20
	6	3636,70	3369,60	267,10
	MÉDIA	3624,30	3365,07	259,23

Tratamento CPs	900°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
NÃO PINTADOS	1	3850,10	3541,80	308,30
	2	3829,30	3518,60	310,70
	3	3769,30	3467,10	302,20
	MÉDIA	3816,23	3509,17	307,07
PINTADOS	4	3818,90	3519,10	299,80
	5	3777,40	3482,00	295,40
	6	3816,00	3515,70	300,30
	MÉDIA	3804,10	3505,60	298,50

Tratamento CPs	900°C			
	CP	PESO ANTES (g)	PESO DEPOIS (g)	PESO REDUZIDO (g)
NÃO PINTADOS	1	-	-	0,00
	2	-	-	0,00
	3	-	-	0,00
	MÉDIA			0,00
PINTADOS	4	-	-	0,00
	5	-	-	0,00
	6	-	-	0,00
	MÉDIA			0,00

APÊNDICE B – Velocidade da onda ultrassônica para as amostras do traço REF.

Tratamento CPs	Dados TCC II - Traço REFERÊNCIA			
	23°C			
	CP	ULTRASSOM ANTES (m/s)	ULTRASSOM DEPOIS (m/s)	Variação (m/s)
NÃO PINTADOS	1	4566,00	4566,00	0
	2	4056,00	4056,00	0
	3	4464,00	4464,00	0
	MÉDIA	4362,00	4362,00	0,00

Tratamento CPs	400°C			
	CP	ULTRASSOM ANTES (m/s)	ULTRASSOM DEPOIS (m/s)	Variação (m/s)
NÃO PINTADOS	1	4444,00	4048,00	396
	2	4362,00	4237,00	125
	3	4424,00	4210,00	214
	MÉDIA	4410,00	4165,00	245,00
PINTADOS	4	4366,00	3999,00	367,00
	5	4329,00	4106,00	223,00
	6	4376,00	4140,00	236,00
	MÉDIA	4357,00	4081,67	275,33

Tratamento CPs	600°C			
	CP	ULTRASSOM ANTES (m/s)	ULTRASSOM DEPOIS (m/s)	Variação (m/s)
NÃO PINTADOS	1	4504,00	2812,00	1692,00
	2	4505,00	2827,00	1678,00
	3	4434,00	2980,00	1454,00
	MÉDIA	4481,00	2873,00	1608,00
PINTADOS	4	4484,00	2989,00	1495,00
	5	4494,00	3294,00	1200,00
	6	4514,00	2932,00	1582,00
	MÉDIA	4497,33	3071,67	1425,67

Tratamento CPs	900°C			
	CP	ULTRASSOM ANTES (m/s)	ULTRASSOM DEPOIS (m/s)	Variação (m/s)
NÃO PINTADOS	1	4514,00	669,00	3845,00
	2	4524,00	728,00	3796,00
	3	4640,00	672,00	3968,00
	MÉDIA	4559,33	689,67	3869,67
PINTADOS	4	4454,00	761,00	3693,00
	5	4504,00	795,00	3709,00
	6	4444,00	686,00	3758,00
	MÉDIA	4467,33	747,33	3720,00

APÊNDICE C – Valores da resistência a compressão para as amostras dos traços.

DADOS ORIGINAIS - TRAÇO DE REFERÊNCIA

Fck (MPa)	23°C		400°C		600°C		900°C	
CP	NP	NP	P	NP	P	NP	P	
1	37,29	25,65	28,48	22,58	21,11	10,43	11,55	
2	32,26	23,5	28,79	30,34	28,7	12,7	10,01	
3	32,31	22,54	23,7	25,5	27,98	10,35	10,74	

DADOS ORIGINAIS - TRAÇO COM PET

Fck (MPa)	23°C		400°C		600°C		900°C	
CP	NP	NP	P	NP	P	NP	P	
1	28,11	16,9	22,68	12,42	16,26			
2	28,08	18,89	25,62	11,76	12,25			
3	28,96	25,26	26,47	14,42	7,13			