

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Wagner Fernando Lavandoski Padilha

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO MECÂNICO
E DE DURABILIDADE DE CONCRETO ESTRUTURAL COM
RESÍDUOS DE POLIPROPILENO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ SEM CONTROLE DE QUEIMA EXPOSTO A
ELEVADAS TEMPERATURAS**

Porto Alegre
Julho 2019

WAGNER FERNANDO LAVANDOSKI PADILHA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO MECÂNICO
E DE DURABILIDADE DE CONCRETO ESTRUTURAL COM
RESÍDUOS DE POLIPROPILENO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ SEM CONTROLE DE QUEIMA EXPOSTO A
ELEVADAS TEMPERATURAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ângela Gaio Graeff
Coorientadora: Priscila Marques Correa

Porto Alegre
Julho 2019

WAGNER FERNANDO LAVANDOSKI PADILHA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO MECÂNICO
E DE DURABILIDADE DE CONCRETO ESTRUTURAL COM
RESÍDUOS DE POLIPROPILENO E CINZA DE CASCA DE
ARROZ SEM CONTROLE DE QUEIMA EXPOSTO A
ELEVADAS TEMPERATURAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pela Professora Orientadora e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2019

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
PhD pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Priscila Marques Correa (UFRGS)
M.Sc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Co-orientadora

Jacinto Manuel Antunes de Almeida (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Paula Manica Mazzari
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais, Salete Maria
Lavandoski e Jorge dos Santos Padilha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, professora Ângela Gaió Graeff, pelos conhecimentos, orientações e conselhos recebidos durante o desenvolvimento deste trabalho e da graduação.

Agradeço à minha co-orientadora, Priscila Marques Correa, cujas contribuições foram fundamentais para a elaboração e melhoria deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Salete e Jorge, e familiares, Jhenifer, Matheus e Eloá, pelo apoio fundamental nos momentos de incertezas e turbulências.

Agradeço toda a equipe do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais, em especial aos técnicos Edgar e Fontes e aos bolsistas Ronaldo e Leandro pela colaboração e paciência durante o período experimental deste trabalho.

Agradeço à Engenheira Maria da Graça por ser um exemplo pessoal e profissional. Também gostaria de agradecer às suas filhas, Martha e Sandra. Um agradecimento especial também à Penny, Barbie, Molinho e Duque, por fazerem me sentir mais parte da família.

Agradeço à família Dias Ferreira, especialmente à Mara e ao Marcos, amigos que se tornaram exemplos. Um agradecimento especial ao Tiago e ao Lucas por compartilharmos muitos momentos importantes.

Agradeço à minha esposa, Ákila, por vibrar na mesma frequência.

Agradeço aos meus grandes amigos Afonso Menegola, Eduardo Hirt, Frâncio Rodrigues e Jairo Garcez, por contribuírem em minha formação pessoal e profissional.

Agradeço à Associação Comunitária do Campo da Tuca.

Agradeço à Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda.

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Pois que viver
não é entrar no mar onde dá pé,
mas mergulhar com fé no maremoto.

Flora Figueiredo

RESUMO

Na construção civil, a reciclagem e reaproveitamento de diversos materiais antes vistos somente como resíduos tem encontrado aplicação recorrente para o desenvolvimento de concretos com função estrutural, agregando ao desempenho a viabilidade econômica e desenvolvimento sustentável. Na área de segurança contra incêndio, o não comprometimento acentuado desse material estrutural é um importante objetivo. Entretanto, a literatura sobre o impacto das altas temperaturas nas características mecânicas e de durabilidade em concretos com adições de resíduos sem tratamento e controle prévio ainda é incipiente. Tendo isso em vista, este trabalho apresenta os resultados obtidos experimentalmente em situação de elevação de temperatura em termos de desempenho mecânico, avaliado com ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade, e também de durabilidade por meio de ensaios de absorção e índice de vazios. O procedimento experimental avaliou concreto convencional, concreto com flocos de polipropileno, concreto com cinza de casca de arroz e concreto com as duas adições. Os traços destes concretos estruturais foram concebidos com adição de materiais sustentáveis, sendo estes resíduos de polipropileno pós-consumo na condição de floco e cinza de casca de arroz sem o controle da temperatura da queima. Os quatro traços de concreto apresentaram decréscimo de desempenho mecânico tanto em termos de resistências, quanto em termos de módulo de elasticidade com a elevação das temperaturas. A adição de flocos de polipropileno, em substituição parcial em volume à areia, gerou perdas de desempenho mecânico importantes. Divergindo desse comportamento, a adição de cinza de casca de arroz sem controle de queima e moída por duas horas não diminuiu o desempenho mecânico do concreto significativamente. Resultados percentuais de absorção e índice de vazios aumentaram progressivamente com a temperatura, indicando deteriorações da estrutura do compósito, ocasionando efeitos negativos no que diz respeito à durabilidade. A adição de cinza não alterou de maneira relevante a absorção ou índice de vazios, exceto quando em combinação com os flocos de polipropileno, demonstrando uma tendência à formação de poros no interior da matriz cimentícia quando da adição do polímero. Por fim, a importância do estudo de concretos com rejeitos menos tratados industrialmente, como a cinza sem controle de queima, por exemplo, pode originar uma maior utilização de materiais muitas vezes descartados incorretamente no meio ambiente.

Palavras-chave: Altas temperaturas, Cinza de casca de arroz, Concreto, Polipropileno.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Delineamento do trabalho.....	20
Figura 2 - Triângulo do fogo.....	22
Figura 3 – Curva Incêndio padrão ISO 834	23
Figura 4 – Fases típicas de um incêndio	24
Figura 5 – Mecanismos de transferência de calor.	25
Figura 6 – Resistência à compressão de CPs ensaiados a quente	28
Figura 7 – Evolução das fases cristalinas com a temperatura.....	30
Figura 8 – Aumento da porosidade com o aumento de temperatura.....	32
Figura 9 – Variação de resistência e módulo de elasticidade com a temperatura.....	33
Figura 10 – Variação da resistência a compressão e compressão diametral com a temperatura.....	33
Figura 11 – Composição percentual em massa de polímeros no resíduo sólido urbano.....	35
Figura 12 – Simbologia de material em polipropileno.....	36
Figura 13 – Comportamento de fibras de pp em concretos em altas temperaturas....	38
Figura 14 - Comportamento da fibra de polipropileno em temperaturas elevadas....	39
Figura 15 – Reatividade de cinzas queimadas em diferentes temperaturas.....	41
Figura 16 – Influência da moagem na pozzolanicidade de cca.....	42
Figura 17 – Programa experimental do trabalho.....	46
Figura 18 – Variáveis de estudo.....	47
Figura 19 – Peneira com abertura de 4 mm (a); PP cortado em pedaços retangulares (b); moinho de facas (c).....	51
Figura 20: Cinzas de casca de arroz sem controle de temperatura de queima.....	52
Figura 21 –Curva granulométrica da cinza da casca de arroz moída por 2 horas.....	53
Figura 22 - Separação de materiais (a); areia média misturada com pp (b); brita 1 (c); cinza de casca de arroz (d)	55
Figura 23 – Verificação do abatimento.....	55
Figura 24 - Classes de consistência.....	56
Figura 25 -Vibração de corpos de prova.....	56
Figura 26 - Concreto com PP após exposição a 300°C.....	57
Figura 27 - CPs sendo resfriados em forno e verificados com termômetro laser.....	58
Figura 28 – Imersão em água por 72h (a); ebulição dos CPS durante 5h (b); pesagem hidrostática (c); pesagem do CP saturado (d)	60
Figura 29 – Prensa hidráulica shimadzu modelo UH-I 2000kN.....	61
Figura 30 – Ensaio de compressão axial em corpo de prova.....	61
Figura 31 – Aparato de madeira para posicionamento dos CPs na prensa.....	62

Figura 32 – Ensaio para determinar a resistência à tração por compressão diametral	63
Figura 33 – Preparo dos corpos de prova com os LVDTs (a); ensaio para determinar o módulo de elasticidade (b).....	64
Figura 34 – Curvas de resistências à compressão residuais em altas temperaturas....	66
Figura 35 – Perda percentual de resistência à compressão.....	67
Figura 36 – Curvas de resistência residual à tração em altas temperaturas.....	69
Figura 37 – Comparativo de perdas percentuais em tração e compressão do traço CCAPP.....	70
Figura 38 – Decomposição de flocos de PP por temperatura.....	71
Figura 39- Curvas de módulos de elasticidade residual em altas temperaturas.....	73
Figura 40 - Perdas de módulo e resistência à compressão em concretos sem PP em flocos.....	73
Figura 41 - Perdas de módulo e resistência à compressão percentuais em concretos com PP em flocos.....	74
Figura 42 – Absorção percentual média em função da temperatura.....	77
Figura 43 - Curvas de índice de vazios percentual média em função da temperatura	77
Figura 44 – Degradação com o aumento de temperatura do traço cca.....	78
Figura 45 - Degradação com o aumento de temperatura do traço cca pp.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condutividade térmica de materiais.....	31
Tabela 2 – Características do polipropileno.....	34
Tabela 3 – Características de variadas fibras.....	37
Tabela 4 – Caracterização do aglomerante.....	48
Tabela 5 – Caracterização da areia média do Jacuí.....	48
Tabela 6 – Caracterização do agregado graúdo.....	49
Tabela 7 – Características do aditivo.....	50
Tabela 8 – Moinho de bolas e suas medidas.....	52
Tabela 9 – Traços de concreto.....	54
Tabela 10 - Abatimento das amostras.....	56
Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão dos quatro traços de concreto.....	65
Tabela 12 - Resistência à compressão média dos quatro traços de concreto [MPa].....	66
Tabela 13 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos quatro traços de concreto.....	68
Tabela 14 - Resistência média à tração dos quatro traços de concreto [MPa].....	69
Tabela 15- Resultados de módulo de elasticidade dos quatro traços de concreto.....	71
Tabela 16 – Módulo de elasticidade médio dos quatro traços de concreto [GPa].....	72
Tabela 17 - Resultados de absorção percentual dos quatro traços de concreto.....	75
Tabela 18 - Absorção e Índice de vazios – média e desvio-padrão (%)	76

LISTA DE SIGLAS

ACCAT - Associação Comunitária do Campo da Tuca

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

C3S - Silicato tricálcico

Ca(OH)₂ - hidróxido de cálcio

CAAL - Cooperativa Agroindustrial Alegrete

CaO - óxido de cálcio

CC – Concreto convencional

CCA – Cinza de casca de arroz

CCAPP – Cinza de casca de arroz e polipropileno

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CP – Corpo de prova

C-S-H - Silicatos de cálcio hidratados

IAP – Índice de atividades pozolânicas

IRM – Índice de reciclagem mecânica

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais

LVDT – Linear Voltage Differential Transducer

NBR – Norma Brasileira

PP - Polipropileno

RSU – Resíduo sólido urbano

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Absorção percentual de água

E_c – Módulo de elasticidade

f_t, D – resistência à tração por compressão diametral

I – Índice de vazios percentual

T - Temperatura

μ_{cca} – média para concreto com adição de cinza de casca de arroz

μ_{ccaC} – perda média de resistência à compressão axial percentual relativa ao concreto com cca em temperatura ambiente

μ_{ccaE_c} - perda média de módulo de elasticidade percentual relativa ao concreto com cca em temperatura ambiente

μ_{pp} – média para concreto com adição de polipropileno

μ_{ppC} – perda média de resistência à compressão axial percentual relativa ao concreto com pp em temperatura ambiente

μ_{ppcca} – média para concreto com adição de cinza de casca de arroz e polipropileno

μ_{ppccaC} – perda média de resistência à compressão axial percentual relativa ao concreto com cca e pp em temperatura ambiente

μ_{ppccaE_c} - perda média de módulo de elasticidade percentual relativa ao concreto com cca e pp em temperatura ambiente

μ_{ppccaT} – perda média de resistência à tração percentual relativa ao concreto com cca e pp em temperatura ambiente

μ_{ppE_c} - perda média de módulo de elasticidade percentual relativa ao concreto com pp em temperatura ambiente

μ_{ppT} – perda média de resistência à tração percentual relativa ao concreto com pp em temperatura ambiente

μ_{ref} – média para concreto sem adições

μ_{refC} – perda média de resistência à compressão axial percentual relativa ao convencional em temperatura ambiente

μ_{refEc} - perda média de módulo de elasticidade percentual relativa ao concreto convencional em temperatura ambiente

σ – desvio padrão

σ^2 - variância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	DIRETRIZES DA PESQUISA.....	18
2.1	OBJETIVO	18
2.2	DELIMITAÇÕES	18
2.3	LIMITAÇÕES	19
2.4	DELINEAMENTO	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	ALTAS TEMPERATURAS	21
3.1.1	Definição	21
3.1.2	Propagação do Calor	24
3.1.3	Diretrizes Experimentais para Incêndios	25
3.2	CONCRETO CONVENCIONAL	25
3.2.1	Efeitos das Altas Temperaturas.....	26
3.2.1.1	No Concreto	27
3.2.1.2	Na Pasta.....	28
3.2.1.3	Nos Agregados	30
3.2.1.4	Nos Vazios	31
3.2.1.5	Nas Propriedades Mecânicas.....	32
3.3	POLIPROPILENO.....	34
3.3.1	Definição	34
3.3.2	Reciclagem de Polipropileno.....	34
3.3.3	Aplicações de Polipropileno na Construção Civil.....	36
3.3.4	Efeitos das Altas Temperaturas em Concretos com Polipropileno	37
3.4	CINZA DE CASCA DE ARROZ.....	39
3.4.1	Definição	39
3.4.2	Características da Cinza de Casca de Arroz	40
3.4.2.1	A Influência da Queima	40
3.4.2.2	A Influência do Grau de Moagem.....	41
3.4.2.3	Cinza de Casca de Arroz Utilizada como Pozolana.....	42
3.4.3	Efeitos das Altas Temperaturas em Concretos com Cinza de Casca de Arroz..	43
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
4.1	ESTRATÉGIA DE PESQUISA	45
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS ADOTADOS	47
4.2.1	Cimento Portland.....	47
4.2.2	Agregado Miúdo	48

4.2.3	Agregado Graúdo	49
4.2.4	Água	49
4.2.5	Aditivo Superplastificante.....	49
4.2.6	PP - Polipropileno	50
4.2.7	CCA - Cinza de casca de arroz	51
4.2.8	Características dos concretos.....	53
4.2.9	Produção de Corpos de Prova	54
4.2.10	Aquecimento dos Corpos de Prova	57
4.2.11	Resfriamento dos Corpos de Prova	58
4.3	ENSAIOS.....	58
4.3.1	Massa específica, índice de vazios e absorção	58
4.3.2	Ensaio de Resistência à Compressão	60
4.3.3	Ensaio de Resistência à Compressão Diametral.....	62
4.3.4	Ensaio de Módulo de Elasticidade	63
5	RESULTADOS	65
5.1	ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	65
5.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL..	68
5.3	ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	72
5.4	ENSAIO DE ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS.....	76
6	CONCLUSÕES.....	80
	REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o concreto tem sido utilizado como objeto de estudo para variadas pesquisas, desde concretos convencionais, concretos de alto desempenho, entre outros. Com as inovações tecnológicas e adições de novos materiais, os concretos estão em um período de desenvolvimento sustentável, em que se reutiliza materiais que eram vistos apenas como resíduos. O conhecimento sobre suas propriedades e comportamento diante das mais diversas situações a que o material é exposto tem aumentado ao longo dos anos, no entanto, apesar de vários acidentes envolvendo situações de incêndio terem ocorrido ultimamente, o acervo literário sobre comportamento e desempenho desses novos materiais aplicados em concretos em situações de incêndio ainda é incipiente.

Embora, materiais como resíduos de produção de arroz em forma de casca e polímeros de polipropileno oriundos de embalagens apresentem aplicabilidade interessante na indústria da construção civil, atualmente são utilizados de maneira bastante processada, seja em formas de cinzas com rigoroso controle do processo de queima, seja o polipropileno apenas em formato de fibras para adição em concretos.

Se exposto a elevadas temperaturas, os materiais utilizados nas construções experimentam uma das condições mais severas de deterioração durante a vida útil de estruturas, sendo essa ação térmica importante para gerar modificações físico-químicas do concreto que alteram suas propriedades mecânicas e de durabilidade (LIMA; KIRCHHOF; SILVA FILHO, 2007).

Por isso, o estudo de comportamento e colapsos de novos concretos com fins estruturais é de fundamental importância para contribuir de maneira a garantir a segurança para saída de edificações sujeitas a incêndios. Nesse sentido, como os sinistros são causa de perda de bens e de vidas, o conhecimento em situação de incêndio é visto com preocupação crescente, mas ainda não como uma cultura em termos de segurança no Brasil (SEITO et al., 2008).

Tendo isso em vista, este trabalho tem por objetivo realizar um estudo experimental, em situação de elevação de temperatura, de desempenho mecânico e de durabilidade de concreto estrutural concebido com adição de materiais sustentáveis, sendo estes resíduos de polipropileno e cinza de casca de arroz. Para isso, a partir de um programa experimental, foram definidos traços de concreto com e sem as adições e expostos a situações de aumento de temperatura de 150°C, 300°C e 600°C. Os resultados foram obtidos em termos de

comportamento mecânico e de algumas propriedades que caracterizam a durabilidade do material.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 OBJETIVO

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar experimentalmente o comportamento mecânico e de durabilidade de concreto com resíduos de cinza de casca de arroz e flocos de polipropileno, em substituição parcial ao cimento e à areia, respectivamente, em situação de elevadas temperaturas, e avaliar o impacto de cada um dos resíduos de maneira isolada e também conjunta no concreto por meio de quatro traços de concreto, sendo eles: concreto convencional, concreto com adição de polipropileno em flocos, concreto com cinza de casca de arroz sem controle de queima e de moagem e concreto misto com ambos os resíduos.

2.2 DELIMITAÇÕES

Esta pesquisa consistirá em expor a elevadas temperaturas quatro traços de concreto, cada um com 48 corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, sendo o primeiro de concreto convencional, o segundo com substituição parcial em 20% de volume de cimento Portland por cinza da casca de arroz sem controle de queima e sem moagem industrial, o terceiro com substituição parcial em 10% de volume de areia média por polipropileno pós-consumo em flocos feitos em moinho de facas com peneira de abertura de 4 mm e, o último, com os dois resíduos com as mesmas substituições em volume dos anteriores. O trabalho, por fim, prevê a realização de experimentos destrutivos para a verificação do comportamento mecânico dos compósitos, sendo eles:

- a) Resistência à compressão.
- b) Resistência à compressão diametral.
- c) Módulo de Elasticidade.

Buscou-se realizar ainda um experimento não destrutivo para avaliação em termos de durabilidade, sendo ele: Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

O processo de reidratação dos CPs através do resfriamento por água ou exposição ao ar por longos períodos não está sendo contemplado na estrutura da pesquisa.

2.3 LIMITAÇÕES

Não faz parte do escopo desta pesquisa o estudo de dosagem dos concretos em análise, tendo em vista que para o cálculo dos traços foram utilizados os métodos e dosagens aplicados e desenvolvidos por Correa (em fase de elaboração) ¹em sua pesquisa de doutorado. Ainda são limitações deste trabalho:

- a) Temperaturas de exposição de 150°C, 300°C e 600°C;
- b) Uso de cimento CP V – ARI RS;
- c) Cura em dois processos, inicialmente em câmara úmida e em seguida em ambiente com temperatura controlada com umidade do ar, apenas;
- d) Resfriamento natural para estabilização da temperatura.

2.4 DELINEAMENTO

Esta pesquisa foi elaborada com base nas etapas presentes na Figura 1, descritas nos próximos parágrafos.

¹ Tese de doutorado de Priscila Marques Correa ainda não defendida, sob o título: Concreto estrutural ambientalmente sustentável com inclusão de resíduos de cinza de casca de arroz e polipropileno.

Figura 1 - Delineamento do trabalho.



(Fonte: próprio autor)

A primeira etapa da pesquisa consiste em pesquisar na literatura os assuntos presentes neste estudo. Assim, no capítulo 3, são abordadas as altas temperaturas; concreto convencional, suas características e comportamento em situação de incêndio; o polipropileno como adição atualmente utilizado em concreto e seu desempenho; e, por fim, a cinza de casca de arroz como adição em concretos e suas características.

O capítulo 4 consiste em definir os procedimentos experimentais e estratégias de pesquisa. Também nessa etapa foram detalhados os materiais e métodos utilizados no presente trabalho.

Após detalhados os materiais e métodos experimentais, no capítulo 5 estão expostos os resultados e análises. Finalmente, no capítulo 6 foi realizada a conclusão do trabalho analisando os objetivos alcançados e sugestões de trabalhos futuros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São abordadas neste capítulo as referências utilizadas nesta pesquisa para o embasamento teórico do estudo experimental realizado. Inicialmente são descritos os conceitos básicos sobre incêndios e altas temperaturas, seguindo então para a descrição de concreto em situação de incêndio, suas características e propriedades durante elevações térmicas. Por fim, os dois subitens na sequência abordam os concretos com as adições utilizadas para realização deste trabalho, o polipropileno e a cinza de casca de arroz.

3.1 ALTAS TEMPERATURAS

O fogo é uma força destrutiva que causa milhares de mortes e bilhões de reais de perdas materiais anualmente. Espera-se que estruturas e edificações estejam protegidas dos estragos de um incêndio indesejado. Mas, infelizmente, incêndios podem ocorrer em quase qualquer tipo de construção. A segurança dos ocupantes, principalmente, depende de muitos fatores na concepção e construção de edifícios, muitas vezes com foco na fuga das pessoas de edifícios em chamas. O acesso dos ocupantes às vias de evacuação e resgate no interior da construção só é possível se os edifícios e partes dos edifícios não entrarem em colapso no incêndio ou permitirem a propagação do incêndio (BUCHANAN, 2002).

A ciência da segurança contra incêndios é um campo multidisciplinar de estudo. Nesse sentido, requer a integração de muitos campos diferentes da ciência e da engenharia, por isso é de grande importância o estudo de novos tipos de materiais em situação de elevadas temperaturas.

3.1.1 Definição

O fogo é iniciado por meio de uma fonte de ignição. Esta gera uma reação em cadeia daqueles possíveis de serem inflamados em combinação com um comburente, nesse cenário há a transformação de materiais em gases. Costuma-se chamar esta configuração em que há comburente, combustível e fonte de calor, de “triângulo do fogo”. Também se nomeia como quadrado caso seja adicionada a reação em cadeia aos três outros elementos, conforme figura 2.

Figura 2 - Triângulo do fogo.

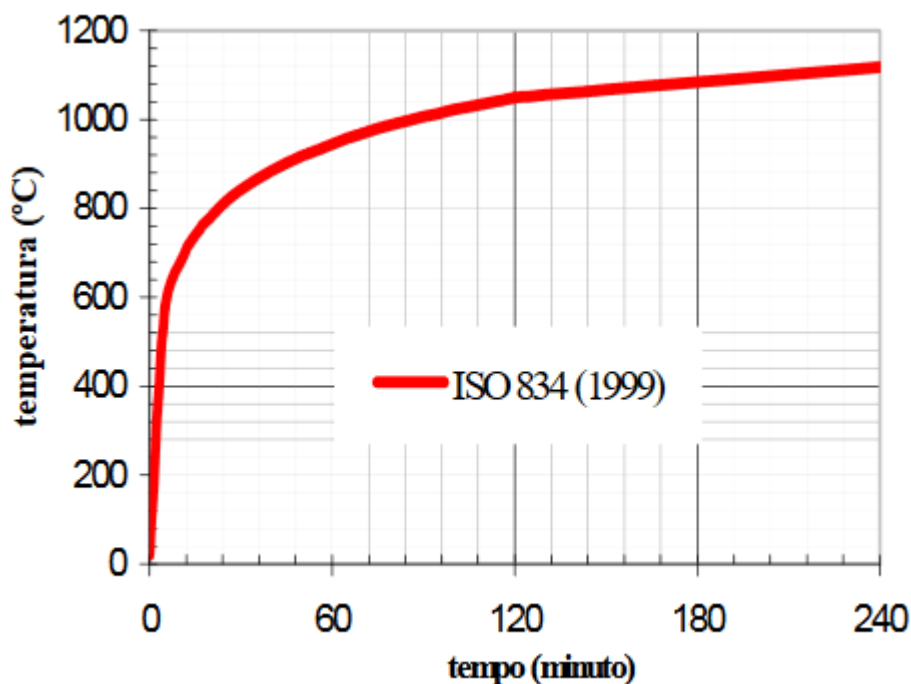


(Fonte: SGC GOIÁS - Manual de Proteção e Combate a Incêndios, 2011)

No estudo de altas temperaturas e segurança contra incêndio, para cada nova simulação, as condições práticas se alteram e, portanto, as curvas temperatura-tempo também. Nesse sentido, na falta de estudos condizentes com a realidade, adota-se uma curva padronizada, conforme figura 3, para servir de base na análise experimental, nos diversos fornos de instituições de ensino, dos materiais expostos à situação de incêndio. Essa é a curva do incêndio-padrão (DIAS, 1998).

Com as diversas soluções de engenharia e arquitetura em termos construtivos em conjunto com as mais diversas formas de decoração de ambientes, torna-se perceptível que o incêndio determinado pela curva padrão não ocorrerá com facilidade no cotidiano, porém essa padronização por meio da ISO 834 serve de embasamento para pesquisas e, dessa forma, possibilita às normas regulamentadoras evoluírem no sentido de aumentar a segurança estrutural das construções usuais no dia a dia (LANDI, 1986).

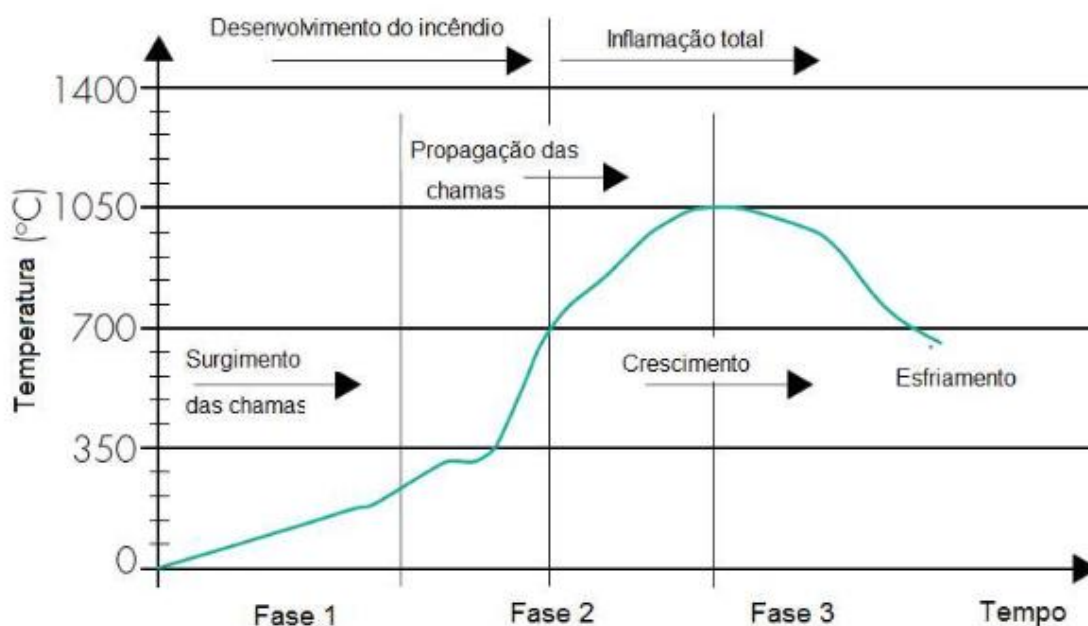
Figura 3 – Curva Incêndio padrão ISO 834.



(Fonte: Souza, 2005)

As fases de um incêndio típico são três. Uma fase inicial com baixas temperaturas, esta sem riscos à vida e sem comprometimento de estruturas. Conforme a temperatura aumenta, há o momento em que a elevação é brusca, este é o chamado *flashover* ou instante de inflamação generalizada, em que todo o combustível entra em ignição. A partir desse momento, o incêndio eleva a temperatura dos gases no ambiente, fazendo com que se espalhe até o material combustível presente ser consumido. Por fim, a temperatura destes gases diminui paulatinamente (VARGAS; SILVA, 2003). Na figura 4 é possível identificar as fases de um incêndio típico.

Figura 4 – Fases típicas de um incêndio.



(Fonte: Graeff, Desir e Silva Filho, 2019)

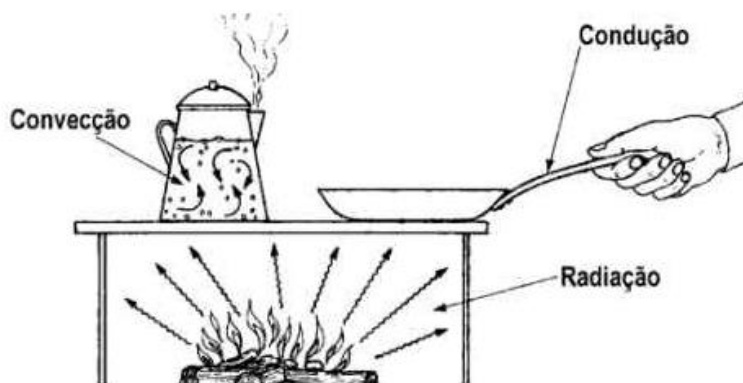
3.1.2 Propagação do Calor

A transferência de calor entre materiais é de fundamental importância para o estudo das altas temperaturas e incêndios, para isso o calor se propaga de três maneiras:

1. Condução: ocorre em corpos sólidos de molécula a molécula, não havendo transferência de matéria;
2. Convecção: ocorre em gases e líquidos através de movimento das massas;
3. Radiação: ocorre transferindo energia por meio de ondas eletromagnéticas, sem que seja necessário um meio para tal.

A figura 5 exemplifica essa propagação.

Figura 5 – Mecanismos de transferência de calor.



(Fonte: Grimm, 1999)

3.1.3 Diretrizes Experimentais para Incêndios

A modelagem de incêndios experimentais, conforme já citado, segue os critérios da curva de incêndio padrão pela ISO 834, sendo indicada internacionalmente para experimentação em estruturas de construção. No entanto, para testes que envolvam a obtenção de resistências residuais de concretos através de corpos de prova recomenda-se a norma RILEM 129-THM, baixas taxas de aquecimento, variando de 1°C a 4°C, e um período de no mínimo 60 minutos de exposição à elevada temperatura. Dessa forma, com a temperatura estabilizada por esse período, é atingida a maior degradação possível do material (Poon et al.,2001 apud ALMEIDA, 2017; Toric et al.,2013 apud ALMEIDA, 2017; Li et al. 2014 apud ALMEIDA, 2017; Annerel e Taerwe,2008 apud ALMEIDA, 2017; Takano et al.,2001 apud ALMEIDA, 2017; Chan et al.,1999 apud ALMEIDA, 2017).

3.2 CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto convencional é, excetuando-se a água, o material mais consumido pela humanidade. Isto se dá pelo fato de o concreto ser um material que apresenta boa resistência, facilidades de obter-se variadas formas e tamanhos, baixo custo, facilidade de manutenção e resistência ao fogo. É um material compósito, sendo a mistura de um aglomerante, o cimento Portland, com agregados graúdos, miúdos e água (MEHTA ; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Neville e Brooks (2013), o concreto é o produto fabricado com um meio cimentante. Diferentemente do convencional, outros concretos podem ser produzidos com uma variada gama de adições, aditivos e materiais tecnológicos, objetivando atender novas necessidades para usos especiais, de maneira que suas propriedades sejam melhoradas.

Quanto da sua utilização, o concreto, mesmo tendo também como características a incombustibilidade, o isolamento térmico e a não liberação de gases, os elementos estruturais devem ser projetados para que sejam satisfeitas as solicitações, de maneira geral tanto as mecânicas quanto às de resistência ao fogo (MONTEIRO, 2017).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o concreto possui diversas propriedades, sendo possível avaliá-las em cada estado em que o compósito é utilizado, o estado fresco e o estado endurecido. De forma genérica, em seu estado fresco é necessário que o concreto possa ser adensado em canteiro e que seja gerada uma mistura coesa para que não segregue. Já no estado endurecido, deve apresentar resistência à compressão condizente com sua utilização, sendo a ela associada, além da qualidade, uma série de propriedades para que o concreto tenha além de desempenho, também aceitável durabilidade, resistência à tração, dentre outras. A resistência à compressão não é o único fator a ser analisado, no entanto, ela é, de maneira geral, associada a propriedades esperadas (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Além disso, conforme Lima et al. (2004), a grande resistência ao fogo sem colapsar é outra dentre as já citadas vantagens de elementos de concreto, por isso o concreto também é especificado, por exemplo, para proteger passivamente estruturas de aço.

3.2.1 Efeitos das Altas Temperaturas

O concreto apresenta, geralmente, bom desempenho quando submetido a ocorrências de fogo. Esse comportamento apresentado traz benefícios para a segurança humana, pois em caso de algum incidente, há tempo para possíveis resgates. Por isso, as soluções em concreto são projetadas considerando o efeito das altas temperaturas. Diferente de materiais como o aço, o concreto quando sofre a ação de temperaturas elevadas mantém sua resistência por períodos maiores. Nesse sentido, a constituição do concreto é importante, pois pasta de cimento e agregados se deterioram com a ação do fogo. Testes em concreto exposto a elevadas temperaturas explicitam que o grau de microfissuração, assim como a resistência mecânica, são induzidos pelas condições dos experimentos e dos elementos, ou seja, corpos de prova ensaiados carregados e aquecidos se comportarão diferente de outros apenas aquecidos. A

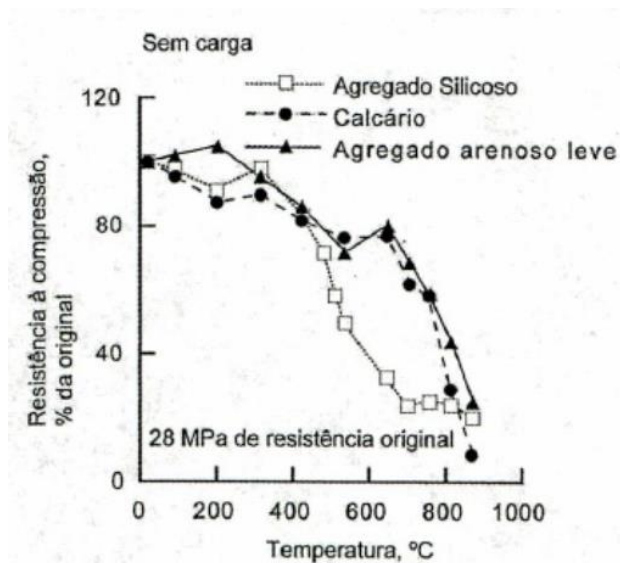
decomposição gasosa, por sua vez, dará origem a pressões internas, sendo então importante a permeabilidade, o volume do elemento e a taxa de aumento de temperatura. Por isso tudo, o comportamento do concreto a elevadas temperaturas é diretamente influenciado por inúmeros fatores em ação simultânea para se obter uma análise clara (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Neville (1997), os efeitos de concretos testados em altas temperaturas, considerando até 600°C, são demasiadamente variáveis, sendo razoável que isso aconteça devido às diferentes tensões atuantes e de umidade do concreto quando aquecido, ao diferente tempo de exposição a elevadas temperaturas e aos vários tipos de agregados. Além disso, é primordial o conhecimento do concreto em condição real de exposição, por exemplo, em situações de elevadas temperaturas causadas por incêndio, a exposição ocorre durante poucas horas, porém o fluxo de calor na massa de concreto é enorme. Por isso tudo, deve-se evitar a generalização em termos de resultados.

3.2.1.1 No Concreto

Conforme Mehta e Monteiro (2008), por possuir uma estrutura por definição heterogênea, muitas variáveis fazem parte da análise de concreto em situação de exposição a elevada temperatura. Os efeitos de exposições de curta duração sobre a resistência à compressão de corpos de prova ensaiados ainda quentes são mostrados na figura 6. Dentre as muitas variáveis, é levado em consideração o tipo de agregado (carbonático ou silicoso, por exemplo) e a condição de carregamento prévio para o ensaio (com ou sem carregamento). Nas resistências entre 23 e 45MPa, a resistência inicial do concreto não interfere decisivamente na percentagem de resistência observada após a exposição a elevadas temperaturas, no entanto o módulo de elasticidade apresenta uma queda maior para os mesmos tipos de concreto exposto às mesmas condições. Este comportamento observado na resistência à compressão diferente conforme o tipo de agregado utilizado se deve a agregados diferentes terem menor diferença em termos de coeficientes de dilatação em comparação com a pasta de cimento, interferindo também na zona de transição, deixando-a mais resistente. Esse comportamento, devido à influência de diferentes agregados, é reduzido quando os corpos de prova são ensaiados após resfriamento até a temperatura ambiente.

Figura 6 – Resistência à compressão de CPs ensaiados a quente.



(Fonte: Neville, 1997)

Ainda sobre a figura 6, é possível perceber que após os 400°C o concreto com agregado silicoso começa o processo de deterioração acentuada de sua resistência, enquanto que em concretos com agregados calcários ou arenosos a redução acentuada se dá apenas após a faixa de 600°C. Pesquisas demonstram que concretos leves apresentam perdas de resistência à compressão menores do que concretos normais, e concretos de alta resistência mostram perdas ainda maiores quando comparadas aos concretos convencionais ou leves. Ainda surge um outro efeito relacionado aos concretos de alta resistência, o fato de haver a possibilidade de ocorrência de lascamentos explosivos relacionados com as altas temperaturas, e esse risco é maior conforme se aumenta a velocidade com que a temperatura sobe e também quanto maior for a saturação do concreto (NEVILLE, 1997).

3.2.1.2 Na Pasta

Uma pasta de cimento corretamente hidratada é formada por silicatos de cálcio hidratados, o C-S-H, e hidróxido de cálcio. Nesse contexto, uma pasta de cimento terá vários tipos de águas em sua constituição, sendo elas a água livre, água capilar e a água adsorvida, contando que a amostra esteja saturada. As consequências da elevação da temperatura na pasta de cimento estão relacionadas justamente com esse grau de hidratação e umidade da mesma, de forma que o material exposto a situação de incêndio fará com que os diversos tipos de água em seu interior sejam convertidas em água em estado gasoso, e a partir deste momento é que a água pode ser

completamente eliminada, para então a temperatura do concreto subir (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O grau de saturação deve ser considerado, pois segundo Neville (1997), apesar de a condutividade da água ser menor do que a da pasta de cimento hidratada, pequenas variações de saturação (10%) podem aumentar a condutividade para 50%, considerando concretos leves. Por isso também menores teores de água/aglomerante resultarão em maiores condutividades de concreto no estado endurecido.

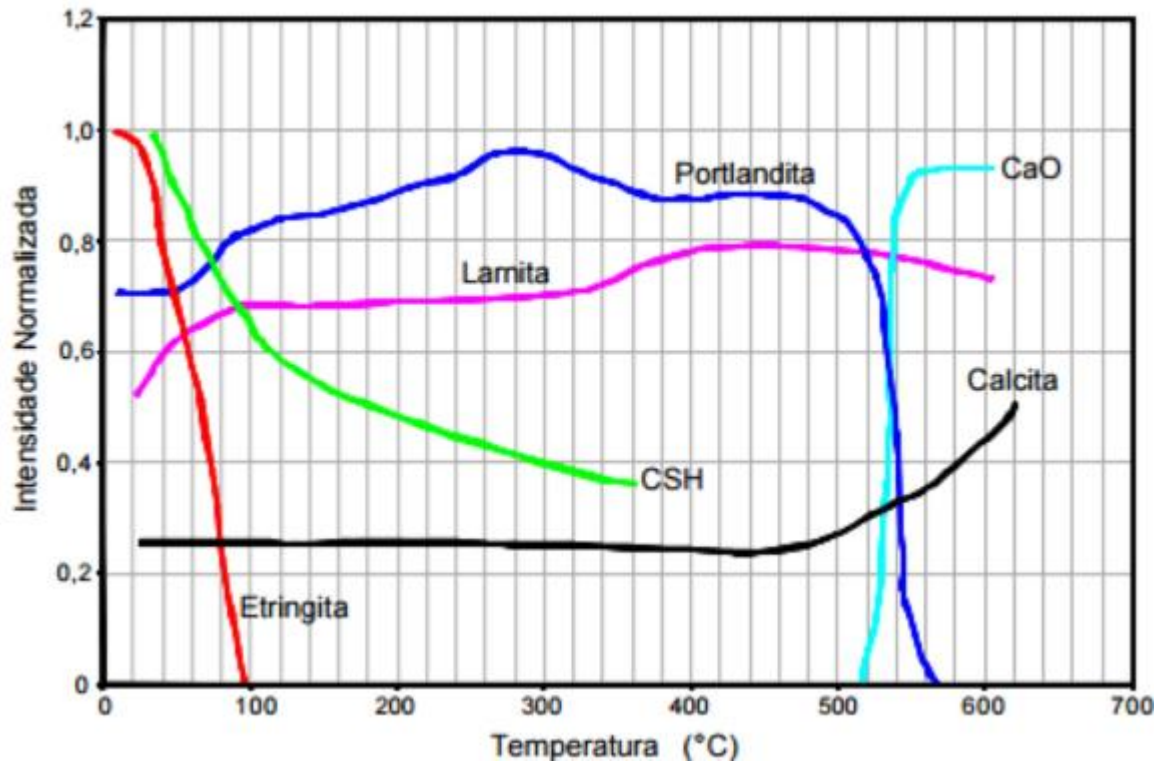
De acordo com Costa et al. (2002), na faixa de temperatura partindo de 4 até 80°C o compósito permanece estável, ocorrendo alteração somente em sua estrutura de poros, surgimento de fissuras e energia de superfície. A partir daí, conforme Lima et al. (2007), em termos de aumento de temperatura, observa-se que no intervalo de 80 a 105°C, a pasta de cimento hidratada não se modifica consideravelmente em termos de estrutura. É a fase em que a etringita começa a ser decomposta, e a água absorvida, a ser liberada.

A temperatura iniciará os processos de impacto completo na estrutura da pasta cimentícia apenas nos 100°C, acima desta temperatura a água intralamelar associada ao C-S-H será eliminada juntamente com a etringita e causará a retração na pasta de cimento (ALMEIDA, 2017).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), o período compreendido entre 200°C a 300°C não tem significativas alterações na pasta e em sua resistência. No entanto, entre 300°C e 400°C, o C-S-H já está deteriorado. A partir disso, a composição mineralógica e o teor de Ca/Si influenciarão na formação de diversos silicatos de cálcio, dada a degeneração do C-S-H. A temperatura continuará aumentando e quando chegar ao patamar de 400°C, juntamente com a pressão de vapor da água, fará com que a portlandita seja desidratada até a temperatura de 500°C. Nesse intervalo de aquecimento enquanto ocorre também a desidratação do hidróxido de cálcio, há a decomposição completa do C-S-H (LIMA et al., 2007).

A figura 7 mostra a evolução com a temperatura dos produtos de hidratação

Figura 7 – Evolução das fases cristalinas com a temperatura



(Fonte: Professor Dario Lauro Klein)

3.2.1.3 Nos Agregados

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a mineralogia do agregado tem uma atuação significativa em concretos expostos a elevadas temperatura, porque o comportamento do concreto acaba submetido a sua taxa de aquecimento, dimensão, umidade e permeabilidade. A mineralogia do agregado torna-se destacada, pois origina expansões diferenciais entre o agregado e a pasta e também a resistência última da zona de transição da interface. Esses danos ocorrem pelo fato de acontecerem expansões nos agregados de 0,85%.

De resto, a influência do tipo de agregado é significativa, pois, segundo Brites (2011), os agregados correspondem a valores de 60 a 80% do volume de concreto, intervindo diretamente na condutividade térmica do material.

Na tabela 1 são apresentados valores característicos de condutividade térmica de materiais.

Tabela 1 – Condutividade térmica de materiais.

Material/Elemento	Condutividade térmica (W/m°C)
Agregados	0,7 - 4,2
Concretos saturados	1,0 - 3,6
Pastas de cimento saturadas	1,1 - 1,6
Água	0,515
Ar	0,0034

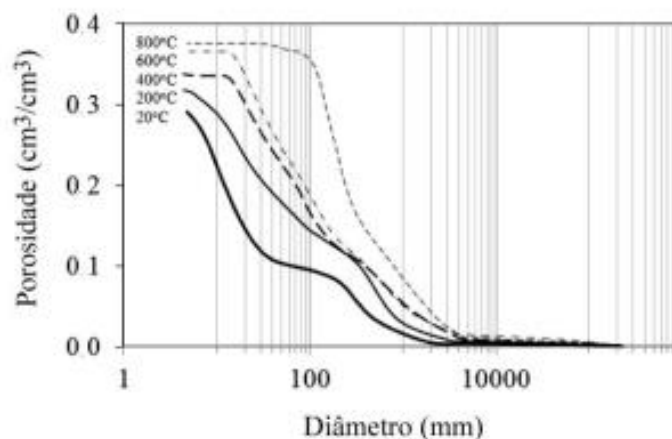
(Fonte: Britez, 2011)

3.2.1.4 Nos Vazios

A importância dos vazios no concreto está atrelada a uma variedade de fatores que estão relacionados. A durabilidade do concreto é exemplo disso, pois além de ser de suma importância, pode ser aumentada e diminuída dependendo principalmente de fatores externos que penetram no concreto ou por fatores internos. O ataque desses agentes é facilitado pelo transporte interno, por sua vez, assistido pela permeabilidade. Sendo essa última a facilidade com a qual líquidos e gases podem se deslocar no interior do compósito e regulada pela porosidade da pasta de cimento, isto é, os vazios (NEVILLE E BROOKS, 2013).

De acordo com Santos (2012), o principal fator que origina o aumento dos vazios no concreto é a movimentação de materiais, esta, por sua vez, gera um desequilíbrio de deformações entre a pasta de cimento e os agregados. Dessa forma, o aumento da porosidade em concretos aumenta até temperatura de 400°C devido a eliminação de água originada dos silicatos hidratados de cálcio. Quando em 150°C a pasta começa a sofrer alterações devido à zona de transição. Quando, no entanto, a temperatura passa dos 300°C, o aumento se deve pelo surgimento de fissuras na matriz e, a partir dos 450°C, os poros iniciam a aumentar de volume conforme pode ser visto na figura 8.

Figura 8 – Aumento da porosidade com o aumento de temperatura.



(Fonte: Almeida, 2017)

3.2.1.5 Nas Propriedades Mecânicas

As propriedades do concreto quando da exposição a situações de incêndios sofrem importantes modificações, sendo importantes e acarretando em diminuição tanto das resistências do material, quanto dos módulos de elasticidade.

De acordo com Neville (1997), concretos de altas resistências e desempenho são acometidos por maiores perdas em situação de elevadas temperaturas, com possíveis lascamentos explosivos, considerando-se permeabilidades mais baixas, porém água mais confinada gerando tensões de tração.

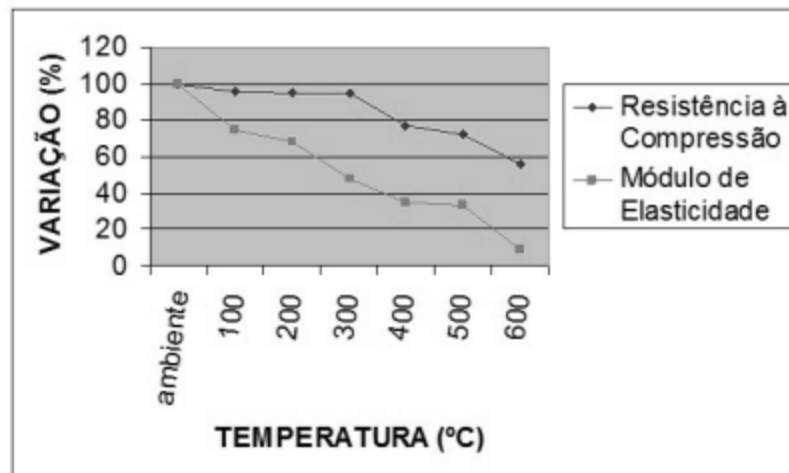
Dessa maneira, para uma análise das propriedades mecânicas, ensaios são realizados considerando o período exposição e tipo resfriamento. Em ensaios que são feitos com procedimento de aquecimento constante a temperatura é consolidada por um determinado período após sua ascensão, para que se iguale no corpo de prova antes do mesmo ser submetido à carga; entretanto, quando a temperatura não é estabilizada, o que caracteriza mais tipicamente um incêndio real, o regime de aquecimento é o transiente (MONTEIRO, 2017).

Outro fator a ser considerado experimentalmente é o tipo de resfriamento a que essas estruturas são expostas, de forma que em um lento resfriamento o calor emitido do corpo de prova se dá por convecção, diferentemente de resfriamentos repentinos, em que essas trocas ocorrem por choques térmicos com água, saturando-se os poros até chegar em baixas temperaturas (ALMEIDA, 2017).

Em conformidade com Santos (2012), independentemente do nível de temperatura em que os corpos de prova são expostos, comparando os dois tipos de resfriamento, a influência é mais negativa em resfriamentos que ocorram por choques térmicos por água.

De maneira simplificada, módulo de elasticidade e resistência variam da mesma maneira (figura 9) com aumento de temperatura, sendo o módulo muito mais afetado pela composição mineralógica dos agregados (NEVILLE, 1997).

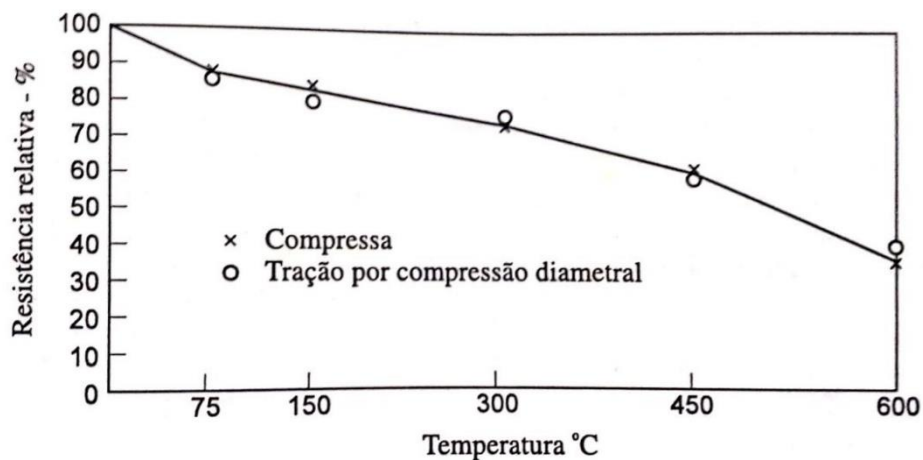
Figura 9 – Variação de resistência e módulo de elasticidade com a temperatura.



(Fonte Neville 1997)

Uma comparação entre resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão pode ser visualizada na figura 10.

Figura 10 – Variação da resistência a compressão e compressão diametral com a temperatura.



(Fonte Neville 1997)

3.3 POLIPROPILENO

3.3.1 Definição

O polipropileno (PP), conforme Trifirò (2013), é um polímero que começa a ser produzido no ano de 1957, alguns anos depois de seu descobrimento, por uma empresa italiana, a Montecatini. É um material termoplástico semicristalino de mediana rigidez e com alta temperatura de fusão, cerca de 165°C, sendo produzido por meio de gases extraídos da nafta, tendo como principais características:

- a) atoxicidade;
- b) elevada resistência mecânica;
- c) hidrofobicidade;
- d) estabilidade térmica;
- e) baixa densidade;
- f) baixo custo de produção.

A multifuncionalidade do PP como plástico é considerável, por este motivo ele é aplicado em diversos setores da indústria produtiva, inclusive a de construção civil. A tabela 2 expõe algumas características do polipropileno.

Tabela 2 – Características do polipropileno

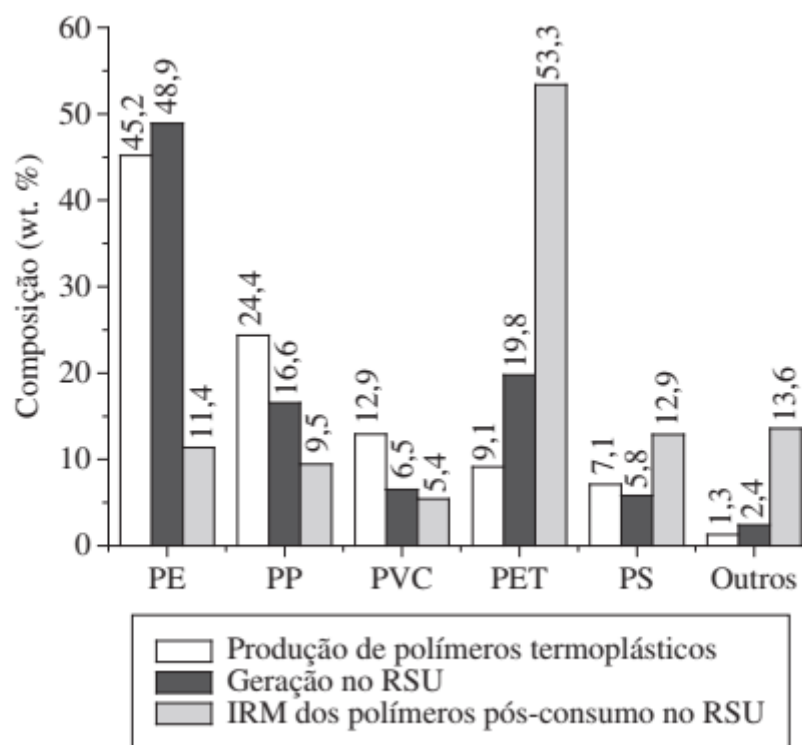
Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Massa molar (g/mol)	Absorção de água	Tg (°C)	Tm(°C)
0,91	13	35	80x10 ³ a 500x10 ³	0,03	4-12	160

(Fonte: Correa, 2015)

3.3.2 Reciclagem de Polipropileno

Materiais poliméricos gradualmente entraram na vida cotidiana e hoje em dia seu descarte incorreto gera resíduos de longo tempo de decomposição e a incineração do material sem correto cuidado causa danos ao meio ambiente (AMASS et al., 1988). Esse aumento é percebido por meio da composição dos resíduos sólidos urbanos (RSU), pois em 2005 sua percentagem em massa já representava 20% de RSU no país (figura 11), diferentemente da época de surgimento desses materiais na década de 1950 (ROMÃO; SPINACÉ; PAOLI, 2009).

Figura 11 – Composição percentual em massa de polímeros no resíduo sólido urbano



(Fonte: Romão et al., 2009)

Muitos aspectos impulsionam a reciclagem destes materiais além do elevado percentual em resíduos urbanos e preservação de recursos não renováveis, conforme Fernandes e Domingues (2006), os aumentos do custo do barril de petróleo, por exemplo, promovem pesquisas e desenvolvimento em termos de reciclagem de polímeros. Além disso, de acordo com Spinacé e Paoli (2004), o aumento da vida útil de aterros sanitários, emprego e renda, somados à diminuição de gastos com saúde pública também fazem parte das vantagens dos processos de reciclagem de polímeros como o polipropileno.

A reciclagem de polímeros mais comum no Brasil é a mecânica, e as explicações para isso variam desde o custo de mão de obra e baixo investimento ao grande volume de consumo plástico no país (SPINACÉ; PAOLI, 2004). E, segundo Canellas (2005), esse processo pode ser dividido nas fases de recuperação, revalorização e transformação, sendo elas:

1. Recuperação: fase em que os resíduos são selecionados pela sua cor e têm seu volume reduzido por prensagem para o transporte, gerando facilidades de transporte e maiores possibilidades de venda no mercado;

2. Revalorização: resíduos, nessa fase, passam por processos de separação mais rigorosa, moagem em moinhos de facas rotativas, lavagem e secagem, gerando flocos do material e aumentando ainda mais a compactação para um transporte mais sustentável;
3. Transformação: etapa de encerramento, nessa fase novos produtos são feitos e o produto-fim é obtido;

Por ser um processo importante, a organização e separação de resíduos, a Associação Brasileira de Normas Técnicas impõe a simbologia e identificação dos plásticos recicláveis, conforme figura 12, por meio da ABNT NBR 13230.

Figura 12 – Simbologia de material em polipropileno



(Fonte: ABNT NBR 13230)

3.3.3 Aplicações de Polipropileno na Construção Civil

As aplicações de polipropileno na construção civil já são usuais, sendo principalmente utilizado em forma de fibras, com o objetivo de aumentar resistência à tração, dessa forma desacelerando o surgimento de fissuras, mas também aumentando a tenacidade do concreto, de forma que o elemento supere maiores deformações após a tensão de pico (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Existe também a possibilidade da utilização do PP em forma de flocos devido às suas características para substituição de agregado, pois o polímero tem como principais vantagens a resistência a álcalis, o ponto de fusão alto (165 ° C) e o baixo preço; entretanto, possui dentre suas desvantagens a baixa resistência ao fogo e baixo módulo de elasticidade (BENTUR; MINDESS, 2007). A tabela 3 mostra a comparação de fibras de polipropileno com outras fibras.

Tabela 3 – Características de variadas fibras

Tipo de fibra	Diametro (μm)	Densidade (g/cm^3)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Aço	100 a 1000	7,84	0,5 a 2,6	210
Aramida	10 a 12	1,44	2,3 a 3,5	63 a 120
Polipropileno	20 a 400	0,9 a 0,95	0,45 a 0,76	3,5 a 10
Polietileno	25 a 1000	0,92 a 0,96	0,08 a 0,60	5
PVA	14 a 650	1,3	0,8 a 1,5	29 a 36

(Fonte: Adaptado de Bentur et al., 2007)

As desvantagens do PP, apesar de importantes, podem ser contornadas pela matriz cimentícia, pois a mesma funciona envelopando as fibras e diminuindo sensivelmente o comportamento danoso ao meio ambiente e a sensibilidade ao fogo (BENTUR; MINDESS, 2007).

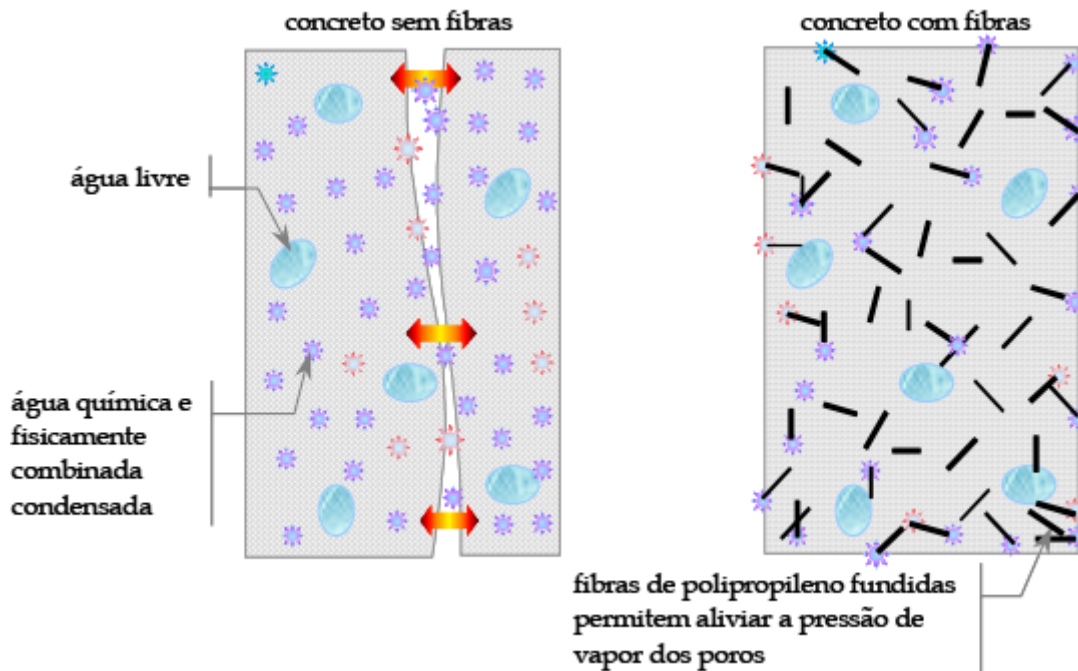
3.3.4 Efeitos das Altas Temperaturas em Concretos com Polipropileno

A utilização de fibras de polipropileno em moderados volumes para concretos convencionais, conforme Lima (2005), pode ser uma alternativa com bons resultados, pois aumenta-se a permeabilidade, facilitando o controle de deslocamentos explosivos, além de não interferir significativamente em resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto.

No que se refere a concretos com reforços de fibra, há um baixo decréscimo em termos de porosidade para temperatura ambiente, sendo que temperaturas de até 400°C as diferenças são pequenas para concretos convencionais e para os de alta resistência (VELASCO, 2002).

Os concretos com fibra sofrem as consequências do ponto de fusão do polipropileno, 165°C, que em situação de incêndio vaporizam e o espaço preenchido pelo polipropileno dá lugar a novos vazios, acomodando as tensões de tração e deterioração geradas pela elevação térmica de acordo com Nince et al. (2003). A figura 13 exemplifica como ocorre os alívios de tensões em concretos com fibras de polipropileno.

Figura 13 – Comportamento de fibras de pp em concretos em altas temperaturas



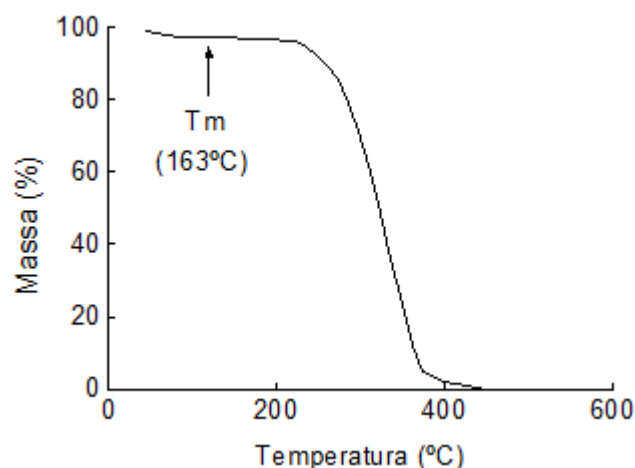
(Fonte: Nince et al. 2003)

No que concerne ao comportamento de fibras de polipropileno, segundo Neomatrix (2008), até cerca de 150°C, não acontecem relevantes reações térmicas (figura 14). Após isso, o polipropileno começa a perder massa em 165°C, ponto em que se inicia a fusão cristalina com modificações de ordem física até cerca de 220°C, havendo então evidente perda de massa. Dessa forma, quando o concreto com polipropileno é exposto a elevação de temperatura, novos caminhos são criados para que haja acomodação das pressões internas geradas pelo vapor d'água originado da água interna. Essa acomodação de pressões colabora no sentido de a pressão de vapor não extrapolar a resistência a tração de concretos, assim diminui-se a possibilidade de deslocamentos explosivos. Conforme Peng et al. (2006), no que diz respeito, por outro lado, à resistência à tração de concretos, o surgimento desses poros interligados somados ao derretimento da fibra colabora para uma diminuição da resistência residual à tração em temperaturas acima dos 400°C, por haver uma maior sensibilidade relacionada à fissuração da resistência à tração.

Ainda deve-se atentar que para o comportamento de concretos com adição de fibras, assume-se que as fibras estão igualmente distribuídas na matriz cimentícia, orientando-se de maneira aleatória. No entanto, é provável que essa suposição não esteja correta, sendo ela dependente

de fatores como a vibração, por exemplo. Vibrações demoradas podem levar ao posicionamento horizontal das mesmas e à concentração nas laterais e fundos dos elementos concretados, pois, o chamado efeito parede leva a maiores concentrações de fibras nas faces dos elementos (BENTUR; MINDESS, 2007).

Figura 14 - Comportamento da fibra de polipropileno em temperaturas elevadas



(Fonte: Salomão, 2001)

3.4 CINZA DE CASCA DE ARROZ

Dado o potencial brasileiro como produtor de arroz, 12 milhões de toneladas em média por ano segundo dados do CONAB (2019), cada vez mais se aproveita a cinza da casca de arroz na indústria da construção civil. As pozolanas oriundas da casca do arroz, usadas em substituição parcial ou na produção de cimentos, são viáveis economicamente e uma alternativa a outros materiais já consolidados, como a sílica ativa e a cinza volante. As características e aplicações que fazem deste resíduo importante para pesquisa e mercado de engenharia serão discutidas nesse item.

3.4.1 Definição

As cascas de arroz são subprodutos gerados por meio do processo de beneficiamento do grão, com forma cônica alongada; é um material volumoso, de superfície irregular e abrasiva, que se

torna um problema ambiental para os engenhos de arroz devido a sua lenta degradação no meio ambiente.

A inserção de suas cinzas em substituição parcial do cimento e fabricação de cimentos pozolânicos favorece menores consumos do cimento Portland, preservando jazidas de calcário, argila e, conseqüentemente, o meio ambiente (TASHIMA, 2006).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), para uma tonelada de arroz, o resíduo gerado em termos de casca é de 200 Kg, podendo ser transformado em 40 Kg de cinza da casca de arroz. Esta cinza deve passar por processos de moagem para que seja transformada em grãos extremamente finos, possuindo, dessa forma, características pozolânicas.

Conforme Tashima (2006), a cinza de casca de arroz é classificada no grupo de pozolanas artificiais, pois são aquelas oriundas de processos agroindustriais em que a cinza é gerada como resíduo. É composto por 20% sílica de base anidra, 30% lignina e 50% celulose, possuindo um teor de sílica final entre 74% e 97% após a queima, com coloração do rosa ao negro, sendo as mais escuras com mais carbono e as mais claras com maior teor de sílica amorfa, a mais reativa e de maior interesse para aplicação como pozolana.

3.4.2 Características da Cinza de Casca de Arroz

3.4.2.1 A Influência da Queima

Conforme Pouey (2006), a CCA é originada de combustões que dependem basicamente de três variáveis:

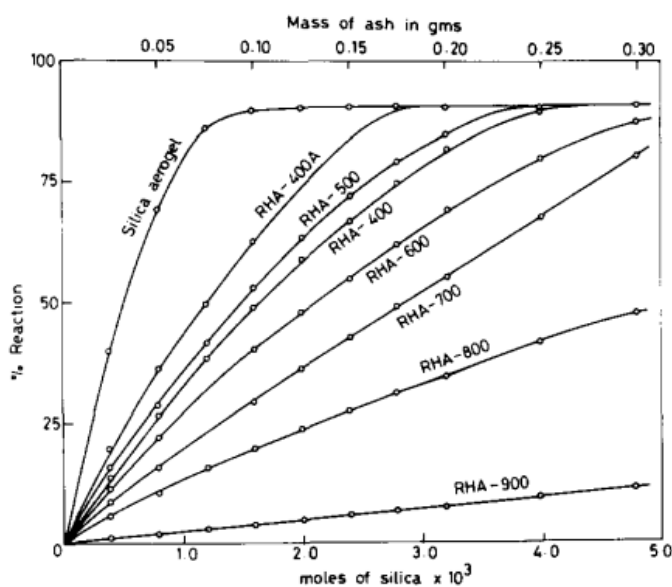
- a) Tipo de forno, podendo ser a céu aberto, fornalhas horizontais tipo grelha ou fornos verticais de leito fluidizado;
- b) Temperatura de queima, podendo ser não controlada;
- c) Tempo de queima.

Além disso, conforme Cordeiro (2009), a taxa de aquecimento tem influência importante, por estar relacionada à reatividade da CCA por meio de sua superfície específica.

De acordo com James e Rao (1986), a temperatura de queima na qual a CCA é produzida tem forte influência sobre a reatividade, conseqüentemente sobre a pozolanicidade da mesma, diferentemente do tempo de exposição da CCA em situação de elevada temperatura. Em seus estudos com casca de arroz queimada por um período de 1h a 30h e submetidas a temperaturas

variando de 400°C a 900°C, chegou-se a resultados com maiores índices de reatividade para menores temperaturas de exposição em tempos de cerca de 6 horas, ou seja, as cinzas mais reativas obtidas apresentam uma temperatura de queima de cerca de 500°C com baixos tempos de queima. A figura 15 mostra o percentual de reatividade de cinzas de casca de arroz queimadas em diferentes temperaturas.

Figura 15 – Reatividade de cinzas queimadas em diferentes temperaturas



(Fonte: James e Rao, 1986)

De maneira geral, as CCA com maior potencial de empregabilidade para fins de construção civil como pozolanas, em termos de temperatura de queima, apresentam temperaturas entre 500°C e 800°C (BARTHA & HUPPERTZ, 1974 apud CORDEIRO, 2009; SMITH, 1984 apud CORDEIRO, 2009; DASS, 1984 apud CORDEIRO, 2009).

As CCA sem controle de queima, entretanto, demonstram bons resultados de empregabilidade como pozolanas, conforme Costa (2015) e Righi (2015) em pesquisas desenvolvidas no laboratório LEME.

3.4.2.2 A Influência do Grau de Moagem

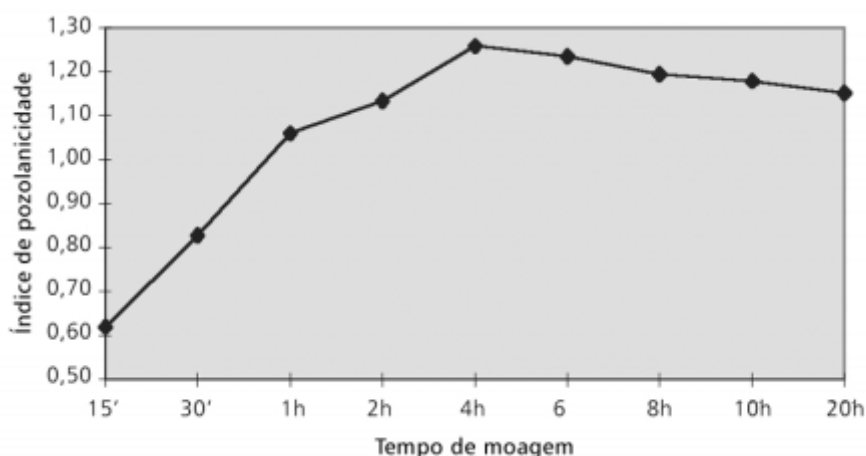
Segundo Cordeiro (2009), a moagem consiste na trituração de compostos sólidos por processos mecânicos de separação, resultando em estruturas com maior nível de compacidade da mistura

moída. O processo de moagem, somado à temperatura de queima da cinza, confere às CCAs maiores finuras e superfícies específicas.

O grau com que as CCAs são moídas influencia de maneira determinante as características físicas das cinzas, modificando a finura do material, conseqüentemente, o tamanho das partículas e aumenta-se o índice de atividades pozolânicas, o IAP (SILVA, 2007).

Aumentos de pozolanicidade de CCA podem ser verificados, conforme figura 16, até tempos de moagem de 4 horas, após esse pico, as quedas são acentuadas, possivelmente por questões de menor mobilidade dos grãos dentro de matrizes cimentícias (PRUDENCIO JUNIOR; SANTOS; DAFICO, 2003).

Figura 16 – Influência da moagem na pozolanicidade de cca



(Fonte: Prudêncio Jr. et al., 2003)

3.4.2.3 Cinza de Casca de Arroz Utilizada como Pozolana

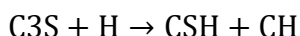
A CCA utilizada como pozolana é normatizada pela ABNT NBR 12653/2015 como pozolana artificial, resultado de tratamentos térmicos ou processos industriais com a característica de ser reagente com hidróxido de cálcio em água, originando produtos com capacidade cimentante. Outros tipos de pozolanas, por exemplo, são o metacaulim e a sílica ativa.

Segundo Neville e Brooks (2013), a casca de arroz é um resíduo com elevado teor de sílica e, se queimado aos poucos em temperaturas em torno de 600°C, dá origem a uma estrutura amorfa e porosa. Essas estruturas são muito reativas, funcionam como catalisadores consumindo Ca(OH)_2 , isto é, aceleram a reação por meio de lenta hidratação de maneira que ocupam espaços entre partículas de cimento, aumentando o empacotamento.

O consumo do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aumenta a durabilidade e a impermeabilidade da matriz cimentícia, porque também ocorre um eficaz preenchimento dos espaços capilares como um todo (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), a reação pode ser entendida da seguinte maneira:

1. Reação rápida:



2. Reação lenta:



No que tange à reação pozolânica em si, a cinza reage com o produto de hidratação do cimento, o hidróxido de cálcio, ou o próprio cimento, dando origem ao C-S-H, grande responsável pela resistência de concretos e argamassas. As características dessa reação são de apresentar ganhos de resistência e liberação de calor de hidratação em menores taxas do que a da reação do C3S do cimento Portland, conforme Tiboni (2007).

3.4.3 Efeitos das Altas Temperaturas em Concretos com Cinza de Casca de Arroz

Concretos com adições de CCA tem como característica graus mais elevados de empacotamento e impermeabilidade, principalmente na zona de transição agregado-pasta. Quando do aumento de temperatura, essas características deixam de ser as vantagens em concretos de elevadas resistências, pois com maiores tensões de vapor internas, há aumento de tensões de tração no concreto e na pasta cimentícia, dando origem à microfissuração. Esse é um efeito diverso do que ocorre em concretos convencionais, pois a zona de transição agregado-pasta funciona como uma espécie de amortecedor de tensões, devido a sua maior porosidade em comparação com os concretos especiais (BENTZ, 2000).

As maiores tensões internas podem representar um comportamento divergente entre concretos convencionais e concretos com adições. De acordo com Neville (2015), menores permeabilidades associadas a altas temperaturas representam uma elevação de riscos de deslocamento explosivos em concretos.

Os deslocamentos explosivos em amostras de concreto com pozolanas podem ser a consequência de microestruturas densas e baixa porosidade, sendo razões relevantes para baixos desempenhos de concretos com adições sob elevadas temperaturas. Esses deslocamentos podem ser observados em temperaturas acima dos 400°C (POON et al., 2003).

Segundo Lima 2005, adições minerais em concretos sob altas temperaturas agem no sentido de colmatar os poros da matriz cimentícia, gerando o preocupante problema de *spalling*. Esse fenômeno, entretanto, não é dependente única e exclusivamente da maior compactidade de compostos cimentícios com pozolanas, pois dentre as variáveis, o tipo de agregado do concreto tem elevada importância, por exemplo.

A contribuição em termos de consumo de hidróxido de cálcio da CCA faz com que a reação de transformação de Ca(OH)_2 em CaO para temperaturas até cerca de 400°C seja diminuída, acarretando menores teores de reidratação do óxido, conseqüentemente, menores desagregações posteriores (NEVILLE, 2015).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho tem origem na pesquisa experimental sobre concreto estrutural com inclusão de resíduos de CCA e PP desenvolvido por Correa (em fase de elaboração)². O objetivo principal deste trabalho é analisar experimentalmente o comportamento desse concreto ambientalmente mais sustentável em situação de elevadas temperaturas conforme explicitado anteriormente.

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos experimentais, a dosagem e os materiais para confecção dos concretos de estudo, metodologia adotada para sua elaboração, assim como sua moldagem, cura dos corpos de prova e, por fim, os ensaios de laboratório.

4.1 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

A partir do programa experimental são estipulados os experimentos e as etapas que serão necessárias para se realizar os ensaios de laboratório. Na figura 17 está representado um diagrama do programa estabelecido.

² Tese de doutorado de Priscila Marques Correa ainda não defendida, sob o título: Concreto estrutural ambientalmente sustentável com inclusão de resíduos de cinza de casca de arroz e polipropileno.

Figura 17 – Programa experimental do trabalho



(Fonte: próprio autor)

Com estes experimentos têm-se o objetivo, para as quatro tipologias de concreto elaboradas, de verificar o desempenho mecânico por meio de ensaios de resistência à compressão, resistência à compressão diametral e módulo de elasticidade. Para a verificação em termos de durabilidade, utilizar-se-á o ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Cada ensaio contou com 3 corpos de prova para cada tipo de concreto e para cada uma das quatro faixas de temperaturas adotadas, totalizando 192 corpos de prova para a realização do trabalho.

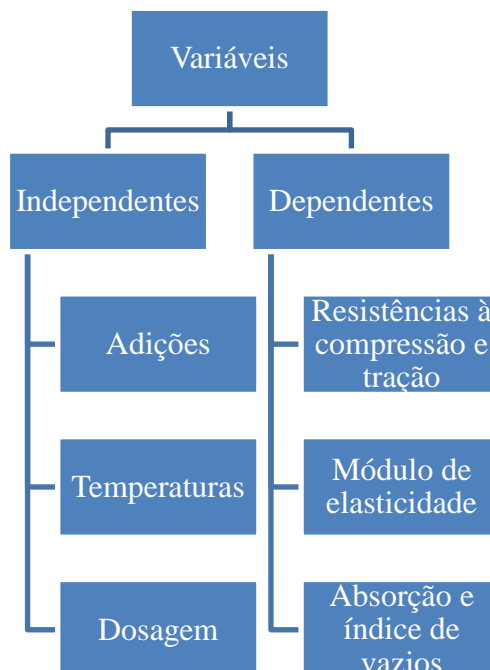
As variáveis dependentes e independentes foram definidas da seguinte maneira: materiais componentes como as adições, dosagem (traço e relação água/aglomerante) e temperatura foram consideradas como variáveis independentes, as duas primeiras já conhecidas da pesquisa em andamento e a terceira definida inicialmente no projeto de pesquisa.

As variáveis dependentes são as características apresentadas pelo concreto após a sua produção e são:

- a) Resistência à compressão;
- b) Resistência à compressão diametral;
- c) Módulo de elasticidade;
- d) Absorção e índice de vazios.

As variáveis de estudo estão representadas no diagrama da figura 18.

Figura 18 – Variáveis de estudo



(Fonte: próprio autor)

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS ADOTADOS

4.2.1 Cimento Portland

Como aglomerante utilizou-se o cimento Portland CPV ARI-RS, da marca Nacional, por ser o tipo de cimento mais utilizado em termos de pesquisas, pois apresenta baixos teores de adições em comparação com os demais tipos de cimento. A caracterização do cimento está apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Caracterização do aglomerante

Cimento		
Parâmetros CPV - ARI Nacional	Resultado	Exigência
Diâmetro médio(μm)	11,56	-
Finura de Blaine(cm^2/g)	4401	≥ 3000
Massa específica(g/cm^3)	3,11	-
Perda ao fogo (%)	2,56	$\leq 4,5$
Expansibilidade a quente (mm)	0	$\leq 5,0$
Tempo de pega - início (min.)	140	≥ 60
Tempo de pega - fim (min.)	187	≤ 600
Al ₂ O ₃ (%)	1,92	-
CaO(%)	68,11	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2,96	-
SiO ₂ (%)	17,83	-
K ₂ O(%)	1,28	-

(Fonte: Almeida, 2017)

4.2.2 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo foi utilizado areia natural quartzosa média lavada do Rio Jacuí. Os resultados são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização da areia média do Jacuí

Areia média		
Abertura da peneira [mm]	% retido	% retido acumulado
6,3	0	-
4,75	0	0
2,36	4	4
1,18	10	14
0,6	30	44
0,3	45	89
0,15	0	89
$\leq 0,15$	11	100,00
Diâmetro máximo característico [mm]		2,36
Módulo de finura		2,4
Massa específica [g/cm^3]		2,63

(Fonte: Almeida, 2017)

4.2.3 Agregado Graúdo

Como agregado graúdo foi utilizada brita graduada n°1 basáltica de Porto Alegre com diâmetro máximo característico de 19 mm e caracterizado conforme tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização do agregado graúdo

Brita 1		
Peneira	% retido	% retido acumulado
25	0	0
19	5	5
12,5	75	80
9,5	19	99
6,3	1	100
<6,3	0	100
Diâmetro máximo característico [mm]		19
Módulo de finura		7,04
Massa específica [g/cm³]		2,9

(Fonte: Almeida, 2017)

4.2.4 Água

Para as quatro concretagens foi utilizada a água da rede pública de fornecimento de Porto Alegre.

4.2.5 Aditivo Superplastificante

Neste trabalho, para os traços com misturas de CCA, utilizou-se o aditivo superplastificante SP-II Tec-Flow 8000 da empresa GCP *Applied Technologies* e as propriedades fornecidas pelo fabricante encontram-se na tabela 7.

Tabela 7 – Características do aditivo

Aditivo Superplastificante Tec-Flow 8000	
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado
Dosagem recomendada (%)	0,3 a 2,0
Massa específica (g/cm ³)	1,080 - 1,12
Cloretos solúveis em água(%)	<0,15

(Fonte: Adaptado de GCP, 2019)

4.2.6 Polipropileno

O resíduo de polipropileno utilizado foi adquirido através da Associação Comunitária do Campo da Tuca, ACCAT, em forma de potes de sorvete. Após a coleta, os potes foram higienizados com água e detergente e secos com pano de estopa, após isso foram cortados em formatos retangulares de cerca de 4 x 12 cm para que pudessem ser mais facilmente triturados em moinho de facas (figura 19). Os potes foram transformados em flocos de PP em moinho de corte Retsch SM 300 com uma peneira com abertura de 4 x 4 mm.

Figura 19 – Peneira com abertura de 4 mm (a); PP cortado em pedaços retangulares (b); moinho de facas (c)



(Fonte: próprio autor)

4.2.7 CCA - Cinza de casca de arroz

A CCA utilizada nos concretos deste trabalho foi adquirida por meio da Cooperativa Agroindustrial Alegrete Ltda. A CCA da CAAL passa por processo de queima sem controle de temperatura e a aparência dessa cinza pode ser visualizada na figura 20.

Figura 20: Cinzas de casca de arroz sem controle de temperatura de queima.



(Fonte: próprio autor)

A CCA passou por processo de moagem em moinho de bolas durante períodos de duas horas com 20 bolas e 1 kg de cinza, o máximo de massa admissível no equipamento. Na tabela 8, seguem as características do moinho. Por se tratar de uma cinza produzida sem controle de queima, é originalmente uma cinza muito pouca reativa. A moagem contribui para aumentar a pozolanicidade do material.

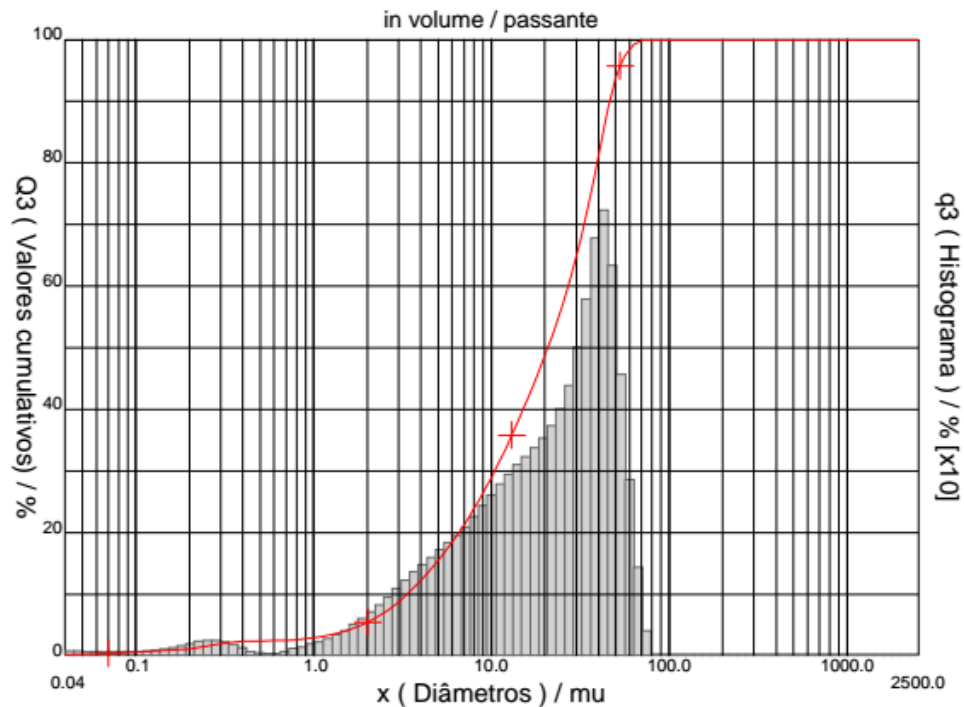
Tabela 8 – Moinho de bolas e suas medidas

Características do moinho de bolas	
Altura moinho (cm)	31
Diâmetro moinho (cm)	27,5
Diâmetro das bolas (cm)	3,9
Peso das bolas (kg)	0,107
Peso total das bolas(kg)	2,14

(Fonte: próprio autor)

Na figura 21 é possível visualizar a granulometria da cinza da casca de arroz.

Figura 21 – Curva granulométrica da cinza da casca de arroz moída por 2 horas



(Fonte: Correa, 2019)

4.2.8 Características dos concretos

Para o presente trabalho, elaborou-se quatro traços de concretos estruturais com resistências de 40 a 55 MPa alternando as adições de CCA e PP entre cada um. Para o cálculo dos traços foi utilizado os métodos e dosagens aplicados e desenvolvido por Correa (em fase de elaboração)³. Os traços realizados estão de acordo com a tabela 9.

³ Tese de doutorado de Priscila Marques Correa ainda não defendida, sob o título: Concreto estrutural ambientalmente sustentável com inclusão de resíduos de cinza de casca de arroz e polipropileno.

Tabela 9 – Traços de concreto

Traço base CC	1 : 1,6 : 2,9 a/c 0,42 (em massa)
Traço PP	substituição 10% volume de agregado miúdo por PP
Traço CCA	substituição 20% volume de cimento por CCA e 0,3% de aditivo
Traço CCAPP	substituição 10% e 20% em volume de agregado miúdo e cimento, respectivamente e 0,3% de aditivo

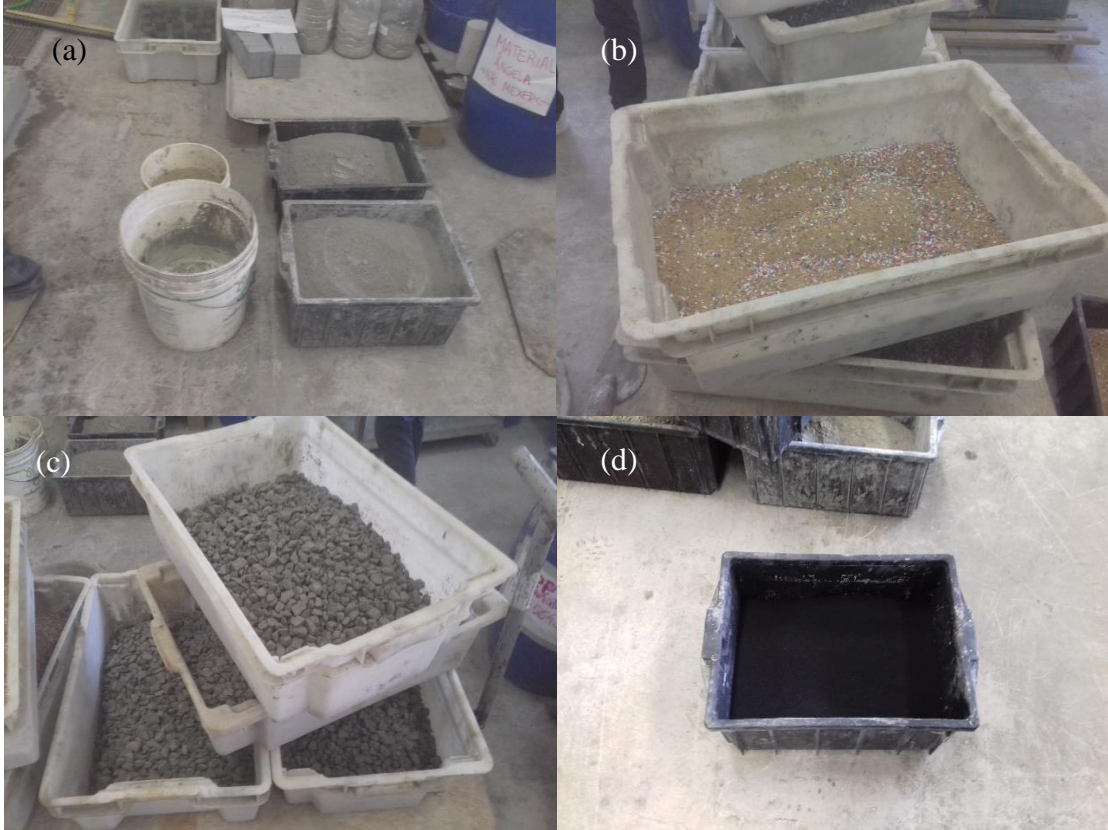
(Fonte: próprio autor)

O concreto foi misturado em betoneira de 400 L.

4.2.9 Produção de Corpos de Prova

Os corpos de prova foram produzidos seguindo a ordem de separação de materiais (figura 22) e imprimação da betoneira. Para iniciar a colocação dos materiais seguiu-se a ordem de brita, parte da água, cimento, areia e restante de água. Quando da adição de PP, o material foi previamente misturado à areia. Para a adição de CCA, o material foi agregado após a areia, misturado em combinação com parte final de água e adicionada a quantidade mínima de aditivo superplastificante recomendado pelo fabricante.

Figura 22 - Separação de materiais (a); areia média misturada com pp (b); brita 1 (c); cinza de casca de arroz (d)



(Fonte: próprio autor)

Conforme figura 23, após a mistura dos materiais em betoneira, procedeu-se a verificação do abatimento. Buscou-se a faixa intermediária de classes de consistência de acordo com a NBR 5738, conforme figura 24.

Figura 23 – Verificação do abatimento



(Fonte: próprio autor)

Figura 24 - Classes de consistência.

Classe	Abatimento mm	Método de adensamento
S10	$10 \leq A < 50$	Mecânico
S50	$50 \leq A < 100$	Mecânico ou manual
S100	$100 \leq A < 160$	
S160	$160 \leq A < 220$	Manual
S220	$A \geq 220$	

(Fonte: ABNT NBR 5738)

Na tabela 10 são relacionados os abatimentos por tipo de concreto.

Tabela 10 - Abatimento das amostras

Abatimento das amostras (cm)			
Traço CC	Traço PP	Traço CCA	Traço CCAPP
6,5	5,5	13,5	7

(Fonte: próprio autor)

Depois de realizados os testes de abatimento, os corpos de prova foram envasados em moldes de 10 x 20 cm de forma cilíndrica e vibrados mecanicamente por 1 minuto sobre uma mesa vibratória em grupos de 8 corpos de prova (figura 25), sendo deixados por 24 horas no laboratório protegidos por lona plástica.

Figura 25 -Vibração de corpos de prova



(Fonte: próprio autor)

Os corpos de prova foram desformados no dia seguinte à concretagem e curados em câmara úmida por 28 dias, seguido por mais um período mínimo de 28 dias em sala seca com temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade na faixa de 60% para estabilização de umidade. Os corpos de prova passaram por processos de pesagem e retificação para preparação para elevação às altas temperaturas e os ensaios.

4.2.10 Aquecimento dos Corpos de Prova

Para o aquecimento dos corpos de prova foi utilizado um forno de câmara da marca Linn Elektro Therm, modelo KK 170 de resistência elétrica, e as temperaturas máximas aplicadas foram de 150°C , 300°C e 600°C a uma taxa de aquecimento⁴ de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A figura 26 mostra alguns corpos de prova no interior do forno. Essa taxa segue a taxa de elevação de temperatura recomendada por Almeida (2017).

O aquecimento ocorreu após a idade do concreto alcançar pelo menos 62 dias, tendo em vista também observar a ocorrência das reações mais lentas da CCA após esse período. Atingidas as temperaturas definidas, os corpos de prova permaneceram expostos durante duas horas na temperatura máxima do ensaio para que fosse atingida estabilização térmica do forno com os corpos de prova.

Figura 26 - Concreto com PP após exposição a 300°C



⁴ Durante o experimento no forno do primeiro grupo de 12 corpos de prova de concreto convencional ocorreu a queima de uma resistência, modificando a taxa de aquecimento para $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$

4.2.11 Resfriamento dos Corpos de Prova

O resfriamento dos corpos de prova ocorreu dentro do forno. Após o tempo de duas horas de exposição ao patamar de temperatura ter transcorrido, a porta foi aberta 10 cm para que houvesse uma diminuição lenta e gradual da temperatura até a mesma chegar em temperatura ambiente e os CPs serem reservados para a realização dos futuros ensaios. As temperaturas dos CPs foram verificadas nos lotes expostos a 150°C, pois os mesmos foram levados à prensa e ensaiados ao fim do dia de exposição (figura 27).

Figura 27 - CPs sendo resfriados em forno e verificados com termômetro laser



(Fonte: próprio autor)

4.3 ENSAIOS

4.3.1 Massa específica, índice de vazios e absorção

A determinação da absorção e do índice de vazios consistiu primeiramente no processo de secagem dos corpos de prova que não foram ao forno em estufa a 105°C durante 72 horas para obtenção de sua massa seca. Diferentemente desses, a massa seca dos corpos de prova submetidos às altas temperaturas foi determinada após a retirada do forno. Após isso, imergiu-se os corpos de prova por 72 horas em água (23°C +/- 2°C), para por fim, realizar-se imersão dos mesmos em água a 100°C durante 5 horas. Após esta etapa, foram medidas suas massas saturada e hidrostática (imersa em água).

Este trabalho apresenta resultados indicativos em termos de durabilidade dos concretos analisados por meio de valores de absorção e índice de vazios percentuais de acordo com a NBR: 9778 (ABNT, 2005): Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica⁵. Dessa forma, reservou-se três corpos de prova para cada traço para cada faixa de temperatura, curados em câmara úmida por período de 28 dias, seguidos por um período mínimo de 28 dias em sala seca com umidade e temperatura controlada até a data dos ensaios.

A absorção e o índice de vazios percentuais são dados pelas equações abaixo:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (\text{fórmula 1})$$

onde:

A é a absorção percentual;

m_{sat} é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura;

m_s é a massa da amostra seca.

$$I = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100\% \quad (\text{fórmula 2})$$

onde:

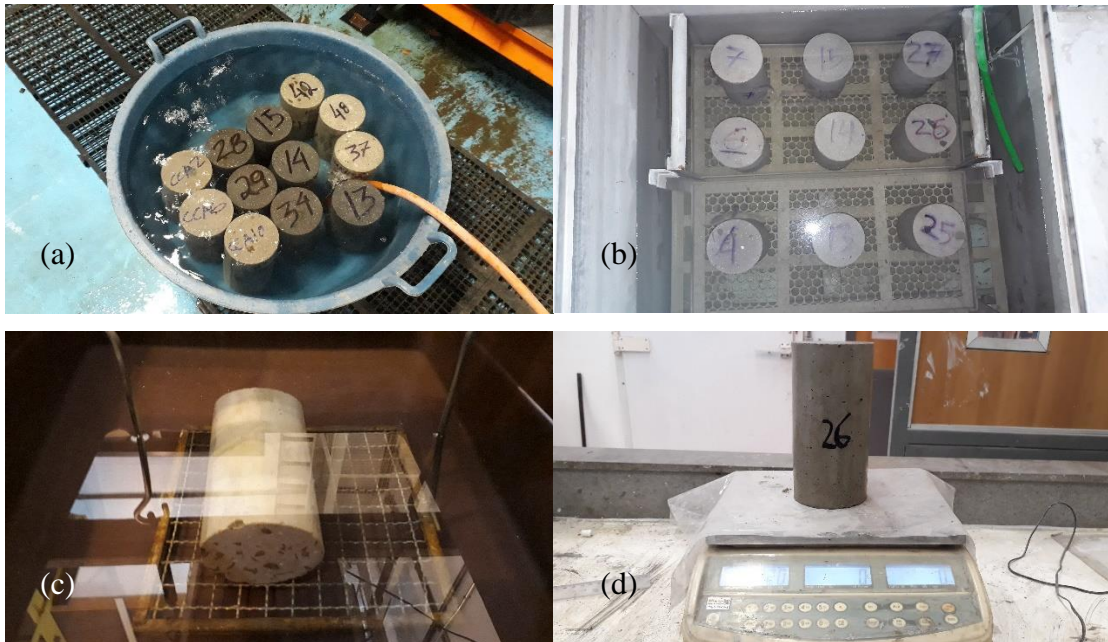
I é o índice de vazios percentual;

m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após imersão e fervura.

A figura 28 mostra as etapas do ensaio de absorção e índice de vazios.

⁵ Os corpos de prova expostos a elevadas temperaturas não foram secos em estufa para obtenção de absorção e índice de vazios.

Figura 28 – Imersão em água por 72h (a); ebulição dos CPS durante 5h (b); pesagem hidrostática (c); pesagem do CP saturado (d)



(Fonte: próprio autor)

4.3.2 Ensaio de Resistência à Compressão

A determinação da resistência à compressão ocorreu após os corpos de prova serem submetidos à elevação de temperatura no forno, resfriando sem controle de temperatura por no máximo dois dias para se estabilizar a temperatura para a temperatura ambiente, facilitando manuseio. Os procedimentos adotados foram baseados na NBR 5739 (ABNT, 2007). A resistência à compressão axial foi avaliada com o objetivo de uma análise de perda de resistência entre os corpos de prova do grupo que não foi levado ao forno e dos corpos de provas degradados pelas altas temperaturas.

O carregamento utilizado foi 0,45 MPa/s em uma prensa hidráulica SHIMADZU modelo UH-I 2000 kN (figura 29).

Figura 29 – Prensa hidráulica shimadzu modelo UH-I 2000kN



(Fonte: próprio autor)

Os corpos de prova foram ensaiados até a ruptura (figura 30), sendo a tensão máxima a compressão um dos parâmetros utilizados para controle do desempenho mecânico do concreto. Coletaram-se dados de três corpos de prova por temperatura, a partir disso obteve-se a média dos resultados. O ensaio para determinar a resistência à compressão axial pode ser visualizado na figura 30.

Figura 30 – Ensaio de compressão axial em corpo de prova

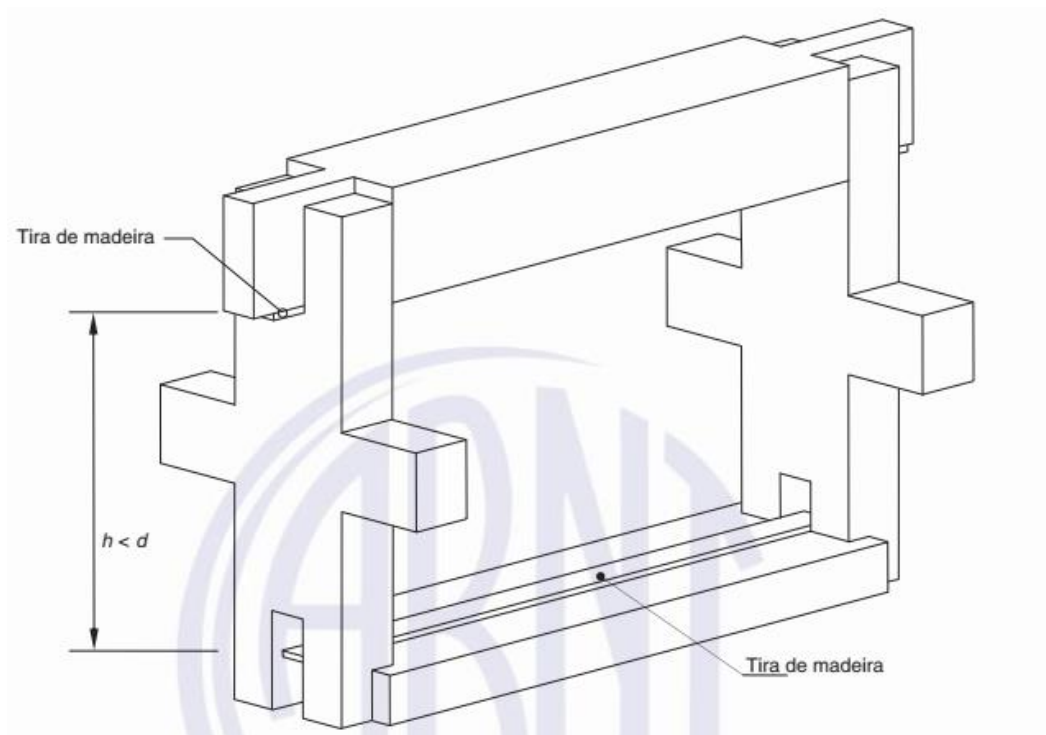


(Fonte: próprio autor)

4.3.3 Ensaios de Resistência à Compressão Diametral

Para a determinação da resistência à tração por compressão diametral, os procedimentos foram baseados na ABNT NBR 7222/2011. O posicionamento dos corpos de prova na prensa seu realizou conforme proposto pela norma (figura 31).

Figura 31 – Aparato de madeira para posicionamento dos CPs na prensa



(fonte: ABNT NBR 7222/2011)

O carregamento utilizado foi de 1,57 kN/s, tendo sido obtida a resistência à tração por compressão diametral após os ensaios por meio da equação abaixo:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (\text{fórmula 3})$$

onde

$f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral em MPa;

F é a força máxima obtida no ensaio em newtons (N);

d é o diâmetro do corpo de prova em mm;

l é o comprimento do corpo de prova em mm.

O ensaio é mostrado na figura 32.

Figura 32 – Ensaio para determinar a resistência à tração por compressão diametral



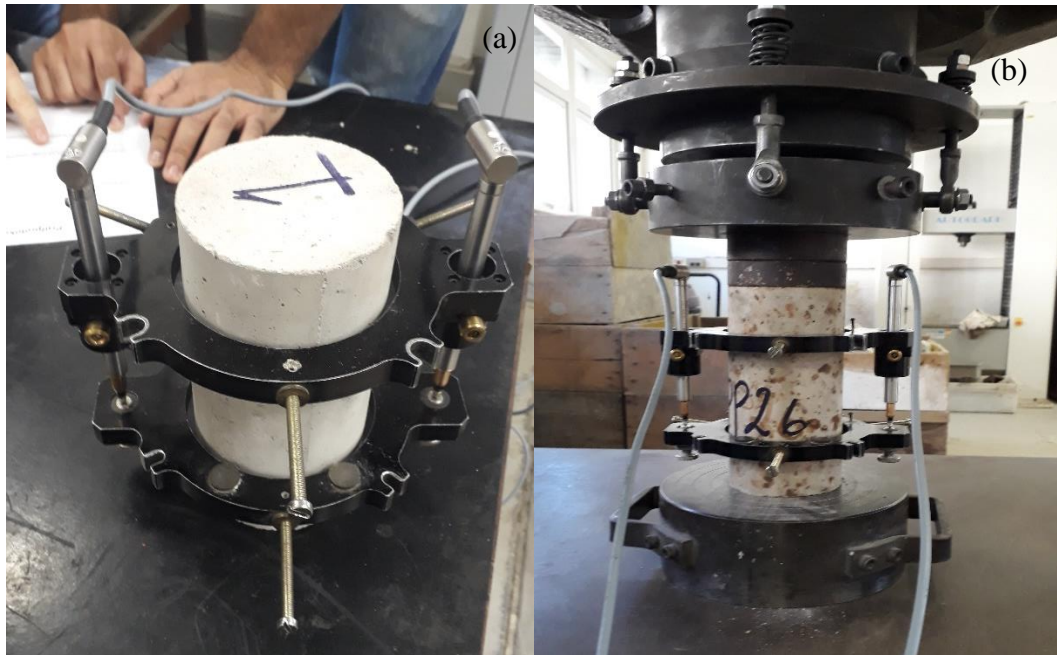
(fonte: próprio autor)

4.3.4 Ensaios de Módulo de Elasticidade

O ensaio de verificação do módulo de elasticidade (figura 33) foi realizado baseado nos procedimentos da NBR 8522 (ABNT, 2017). Da mesma forma que os ensaios de resistência, a verificação do módulo de elasticidade foi realizada a no máximo dois dias após a exposição a elevadas temperaturas, sendo utilizada a mesma prensa hidráulica SHIMADZU.

Nos ensaios, mediu-se os deslocamentos por meio de LVDTs (*Linear Voltage Differential Transducer*) e se obteve a tensão aplicada. O módulo de deformação foi calculado seguindo orientações da norma.

Figura 33 – Preparo dos corpos de prova com os LVDTs (a); ensaio para determinar o módulo de elasticidade (b)



(fonte: próprio autor)

5 RESULTADOS

São apresentados neste capítulo os resultados obtidos a partir dos experimentos, e também as suas análises. Inicialmente, são apresentados os resultados de resistência à compressão com tabelas, gráficos e fotos. Após isso, segue-se o mesmo padrão para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção e, por fim, índice de vazios. Todos os resultados apresentados serão em termos das quatro faixas de temperaturas de aquecimento propostas, sendo elas temperatura ambiente (23°C), 150°C, 300°C e 600°C, relacionando-as com o comportamento mecânico e de durabilidade dos quatro traços de concreto do presente estudo por meio da média e desvio padrão apresentados.

5.1 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL

As tabelas 11 e 12 apresentam os valores de resistência à compressão axial dos experimentos e suas médias e desvios-padrão após a exposição às temperaturas propostas, respectivamente.

Tabela 11 - Resultados de resistência à compressão dos quatro traços de concreto

T(°C)	Referência	10% PP		20% CCA		10% PP - 20% CCA		
		CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP
600	8	25,3	1	12,6	5	19,6	2	13,2
	9	23,0	2	12,6	7	21,3	6	13,0
	10	23,6	5	11,3	8	21,4	9	12,4
300	29	46,3	25	30,7	33	43,5	29	33,7
	30	44,0	29	31,7	35	41,9	31	32,9
	36	46,6	32	32,8	36	41,6	36	29,7
150	37	44,8	39	35,4	41	41,4	38	30,7
	38	43,9	40	34,5	42	41,0	41	31,1
	47	42,5	47	35,5	44	35,4	43	33,0
REF	17	55,3	17	42,7	18	52,3	16	44,6
	19	52,1	19	43,5	19	53,2	19	46,3
	22	49,8	21	41,9	22	54,0	21	46,8

(Fonte: próprio autor)

Tabela 12 - Resistência à compressão média dos quatro traços de concreto [MPa]

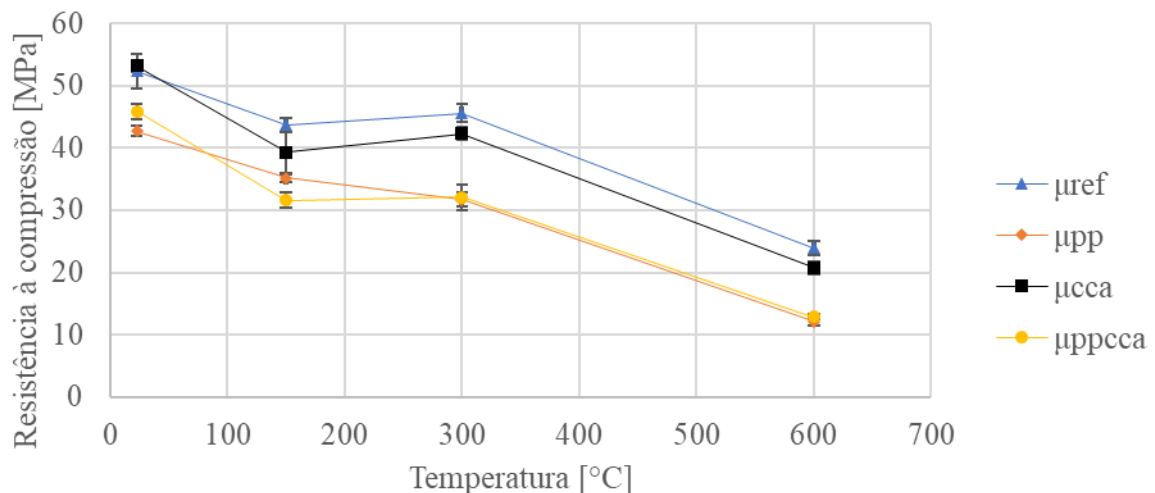
T[°C]	Referência	10% PP			20% CCA			10% PP - 20% CCA					
		μ_{ref}	σ	σ^2	μ_{pp}	σ	σ^2	μ_{cca}	σ	σ^2	μ_{ppcca}	σ	σ^2
600		24,0	1,2	1,4	12,2	0,8	0,6	20,8	1,0	1,0	12,8	0,4	0,2
300		45,6	1,4	2,0	31,7	1,1	1,1	42,3	1,0	1,0	32,1	2,1	4,5
150		43,7	1,1	1,3	35,1	0,5	0,3	39,3	3,4	11,4	31,6	1,2	1,4
REF		52,4	2,8	7,8	42,7	0,8	0,6	53,2	0,9	0,8	45,9	1,2	1,4

(Fonte: próprio autor)

Ao analisar as tabelas é possível verificar resultados próximos, não havendo diferenciais muito elevados dentro dos grupos de mesmo traço. Dessa forma, o tratamento dos dados não desconsiderou nenhum resultado neste ensaio.

A figura 34 apresenta curva com as médias de resistência à compressão por faixa de temperatura, sendo possível analisá-la e observar que a resistência à compressão de todos os traços tem reduções conforme o aumento de temperatura. As maiores perdas foram observadas na temperatura de 600°C conforme esperado, pois após a faixa de temperatura de 400°C ocorre a degradação do hidróxido de cálcio e aos 600°C a forte decomposição do C-S-H (ALMEIDA, 2017).

Figura 34 – Curvas de resistências à compressão residuais em altas temperaturas

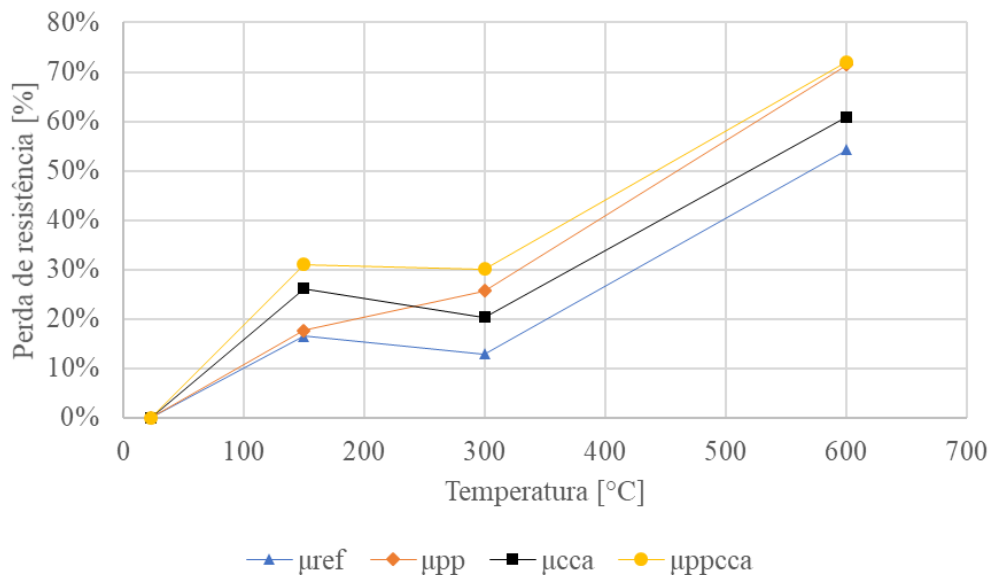


(Fonte: próprio autor)

O comportamento da resistência à compressão dos corpos de prova de concretos com floco de polipropileno em termos de resistência sugeriu diminuições de resistências, sendo ainda um concreto estrutural de considerável resistência a temperatura ambiente, pois está ainda na faixa dos 40 MPa. As perdas apontadas nas temperaturas de 150°C e 300°C estão em um intervalo de 18% a 31% em comparação com os concretos referência ensaiados em temperatura ambiente. Na figura 35 é possível observar um indicativo de comportamento das perdas de resistências percentuais, com exceção do concreto com polipropileno na temperatura de 150°C, os quatro traços sinalizam um comportamento em dois subgrupos, os com adição de flocos de polipropileno demonstram maiores perdas de resistência do que os concretos convencional ou com adição de cinza de casca de arroz. Esses resultados mostram que além do teor das adições, o tipo de adição mineral influencia significativamente na perda de resistência à compressão, conforme Lima (2005).

Com relação ao concreto convencional, os resultados demonstram que na faixa de 300°C as resistências não sofrem alterações relevantes, pois a deterioração completa do C-S-H ocorre após os 300°C (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 35 – Perda percentual de resistência à compressão



(Fonte: próprio autor)

Sobre os resultados demonstrados na figura 35, também se pode atentar para o indicativo de pequeno ganho de resistência dos concretos com adições, exceto o traço com adição de PP somente. Esse resultado poderia indicar um possível efeito do teor de umidade dos concretos

antes de serem expostos a elevadas temperaturas, pois o comportamento de certa forma esperado após a liberação da água livre, a decomposição completa da etringita e o início da degradação do C-S-H em princípio seria de perdas de resistência. Dessa forma, uma possibilidade existente seria a de que estes concretos podem ter sofrido com movimentações internas de água devido ao aumento de temperatura, gerando aumento de resistência por uma hidratação tardia do concreto (ALMEIDA, 2017).

No presente trabalho, os resultados ainda podem ter sugerido um baixo decréscimo de resistência nas mesmas faixas de temperatura devido à uma pequena pozolanicidade do material, comparando-se concreto convencional e concreto com adição de cinza de casca de arroz, por exemplo, a cinza de mesma origem moída por Correa (2019)⁶ durante duas horas apresentou certa atividade pozolânica somada ao efeito filler do material. O resultado também sugere comportamentos condizentes com as conclusões de Righi (2015), pois o tempo de moagem aplicado nessa pesquisa foi de 2 horas, ocasionando em resultados que podem ter um menor efeito da pozolanicidade do material.

5.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

As tabelas 13 e 14 apresentam os valores de resistência à tração por compressão diametral dos experimentos e suas médias e desvios-padrão após a exposição às temperaturas propostas, respectivamente.

⁶ Tese de doutorado de Priscila Marques Correa ainda não defendida, sob o título: Concreto estrutural ambientalmente sustentável com inclusão de resíduos de cinza de casca de arroz e polipropileno.

Tabela 13 – Resultados de resistência à tração por compressão diametral dos quatro traços de concreto

T(°C)	Referência		10% PP		20% CCA		10% PP - 20% CCA	
	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)	CP	Resistência (MPa)
600	5	1,4	3	0,8	1	1,5	3	0,8
	11	1,4	4	1,2	3	1,13*	7	0,7
	12	1,98*	6	1,0	4	1,6	8	1,02*
300	28	3,3	28	2,4	26	3,1	32	2,6
	31	3,3	33	2,4	27	2,5	33	2,1
	34	3,3	36	2,9	30	3,2	35	2,6
150	40	3,1	38	2,9	37	3,6	37	2,8
	41	3,1	41	2,7	40	2,6	39	2,7
	46	3,4	43	2,5	47	3,1	45	3,38*
REF	20	4,3	16	3,5	16	4,5	17	2,9
	21	4,0	18	3,4	20	4,9	22	3,2
	24	4,7	20	3,1	23	3,8	23	3,0

* Valor descartado para o cálculo de médio e desvio-padrão

(Fonte: próprio autor)

Diferentemente dos resultados de resistência à compressão axial, ao analisar as tabelas de resistência à tração é possível verificar resultados com diferenciais acima de 20% da tendência média dos outros elementos do grupo, sendo, portanto, valores considerados impróprios para a representatividade da média.

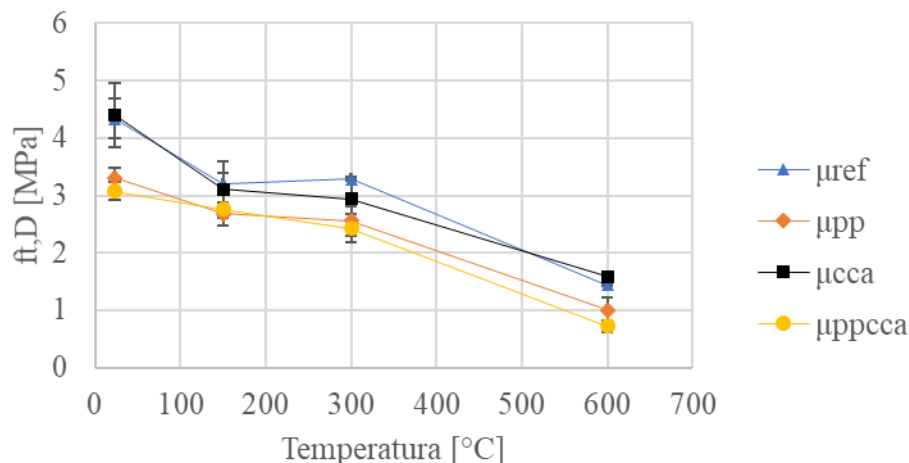
Tabela 14 - Resistência média à tração dos quatro traços de concreto [MPa]

T[°C]	Referência			10% PP			20% CCA			10% PP - 20% CCA		
	μ_{ref}	σ	σ^2	μ_{pp}	σ	σ^2	μ_{cca}	σ	σ^2	μ_{ppcca}	σ	σ^2
600	1,43	0,01	0,00	1,01	0,22	0,05	1,58	0,09	0,01	0,73	0,10	0,01
300	3,29	0,03	0,00	2,56	0,26	0,07	2,94	0,36	0,13	2,43	0,26	0,07
150	3,21	0,19	0,04	2,68	0,19	0,04	3,10	0,50	0,25	2,76	0,03	0,00
REF	4,34	0,35	0,12	3,31	0,18	0,03	4,40	0,56	0,32	3,08	0,16	0,02

(Fonte: próprio autor)

A figura 36 mostra os resultados de resistência à tração por compressão diametral obtido após a exposição a elevadas temperaturas (150°C, 300°C e 600°C) e temperatura ambiente.

Figura 36 – Curvas de resistência residual à tração em altas temperaturas



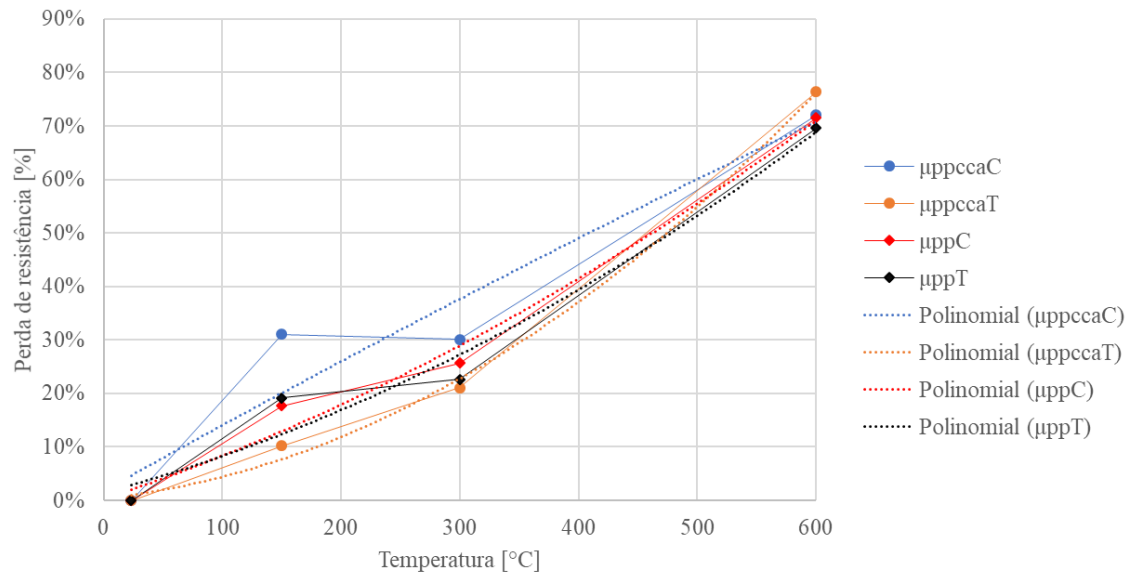
(Fonte: próprio autor)

O comportamento de decréscimo de resistência apresentado no ensaio de resistência à compressão também se verificou para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, porém com indicativos de ganho de resistência na temperatura de 300°C somente no traço referência (figura 36).

Em termos comparativos de perda percentual da resistência à compressão com a resistência à tração, os traços de PP apresentaram uma sugestão de comportamento diferente dos demais. Para os outros traços na tração houve a indicação de perdas percentuais superiores à resistência à compressão, o que pode ser explicado por indícios de dependência maior das fissuras e da decomposição dos produtos de hidratação em altas temperaturas. Nos estudos de Peng et al. (2006), concretos de alta resistência com e sem adição de fibras de PP demonstraram essa sensibilidade maior da resistência à tração a esses fatores.

Na figura 37 é possível observar que após a temperatura ultrapassar a faixa de 300°C, constatou-se as tendências (em linhas tracejadas) de aumento das perdas percentuais de resistência à tração em direção às perdas de resistência à compressão, pois, após esse patamar de temperatura os corpos de prova demonstraram a eliminação significativa dos flocos de polipropileno (figura 38).

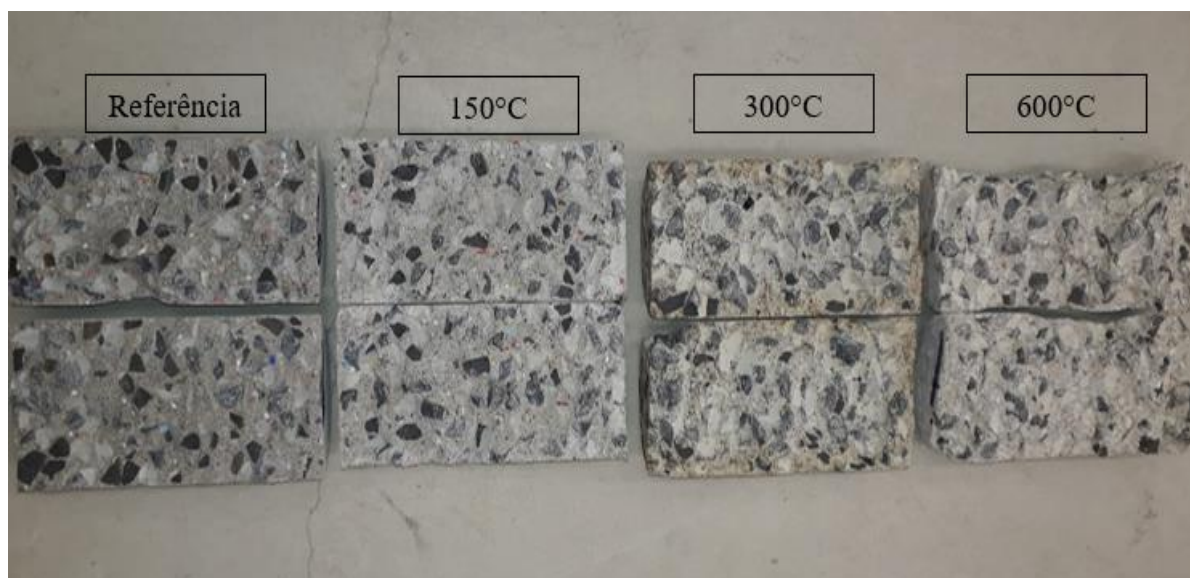
Figura 37 – Comparativo de perdas percentuais em tração e compressão dos traços com PP em flocos



(Fonte: próprio autor)

Na figura 38 é possível visualizar a gradual decomposição dos flocos de PP nas quatro faixas de temperatura para o traço com adição de PP.

Figura 38 – Decomposição de flocos de PP por temperatura



(Fonte: próprio autor)

5.3 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE

As tabelas 15 e 16 apresentam os valores de módulo de elasticidade dos experimentos e suas médias e desvios-padrão após a exposição às temperaturas propostas, respectivamente.

Tabela 15- Resultados de módulo de elasticidade dos quatro traços de concreto

T(°C)	Referência		10% PP		20% CCA		10% PP - 20% CCA	
	CP	Ec (GPa)	CP	Ec (GPa)	CP	Ec (GPa)	CP	Ec (GPa)
600	1	3,20*	7	3,6	9	6,3	4	4,7
	2	6,5	8	3,7	11	6,4	10	5,1
	3	6,1	9	3,8	12	6,3	11	4,4
300	32	23,8	26	12,8	25	22,1	25	12,1
	33	21,7	30	12,4	31	21,8	27	12,3
	35	22,0	34	11,7	32	21,1	28	13,1
150	43	34,3	44	23,8	39	30,7	40	19,1
	45	32,3	45	22,4	46	29,9	44	22,24*
	48	31,2	46	21,7	48	29,7	46	17,1
REF	16	35,9	22	32,1	17	38,3	18	32,0
	18	40,5	23	30,1	21	38,5	20	33,0
	23	38,1	24	31,9	24	39,3	24	30,5

* Valor descartado para o cálculo de médio e desvio-padrão

(Fonte: próprio autor)

Novamente é possível verificar resultados com diferenciais acima de 20% da tendência média dos outros elementos do grupo, sendo, portanto, valores considerados impróprios para a representatividade da média.

Tabela 16 – Módulo de elasticidade médio dos quatro traços de concreto [GPa]

T[°C]	Referência			10% PP			20% CCA			10% PP - 20% CCA		
	μ_{ref}	σ	σ^2	μ_{pp}	σ	σ^2	μ_{cca}	σ	σ^2	μ_{ppcca}	σ	σ^2
600	6,30	0,21	0,05	3,72	0,08	0,01	6,34	0,10	0,01	4,73	0,33	0,11
300	22,49	1,14	1,30	12,28	0,58	0,33	21,67	0,48	0,23	12,48	0,58	0,34
150	32,63	1,58	2,49	22,59	1,07	1,14	30,12	0,52	0,28	18,08	1,38	1,89
REF	38,18	2,31	5,34	31,35	1,13	1,28	38,66	0,52	0,28	31,82	1,26	1,58

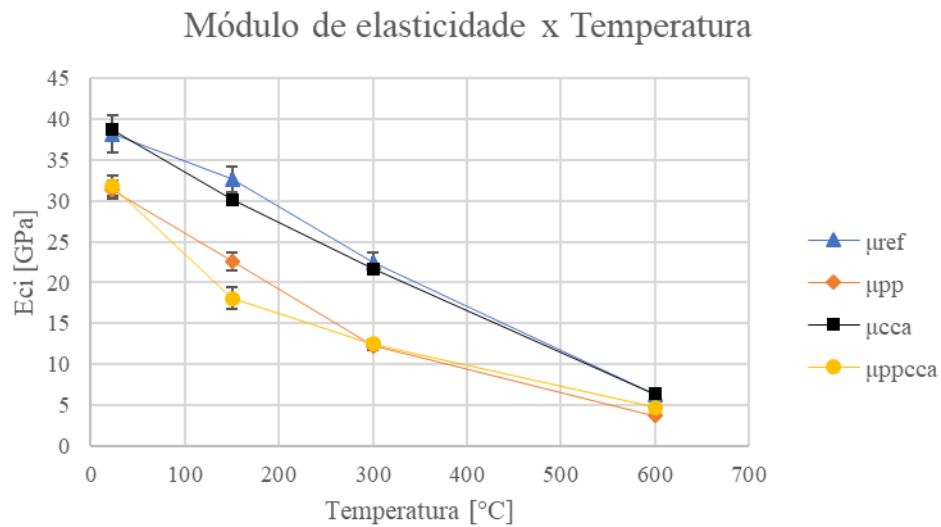
(Fonte: próprio autor)

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade, conforme tabelas 15 e 16, demonstraram uma tendência já visualizada nos traços de concreto quando submetidos à compressão axial. O módulo de elasticidade, entretanto, apresenta decréscimos mais significativos conforme o aumento de temperatura.

Na figura 39 é possível verificar que o comportamento do módulo de elasticidade se divide em dois grupos, com e sem flocos de PP. Como é possível notar, os traços com polipropileno tiveram quedas mais sensíveis até 300°C, indicando possível influência do baixo módulo de elasticidade do polímero em floco. No entanto, quando a temperatura atinge o patamar de 600°C, os quatro traços de concreto tendem a perdas significativas, todos os traços apresentam perdas da ordem de 80% com relação ao inicial. Nesse patamar de temperatura, o comportamento similar dos quatro traços sugere a decomposição significativa do floco de PP assim como do concreto, comportamento já mencionado anteriormente por Mehta e Monteiro (2008) para concretos com as resistências como os do presente experimento.

Os concretos com substituição parcial em volume de agregado miúdo apresentaram essa tendência de diminuição do módulo no ensaio. Esse comportamento pode ser explicado pela natureza trifásica do concreto, pois, além de depender do agregado graúdo utilizado, o módulo também depende da proporção em volume de agregado no concreto (NEVILLE, 1997).

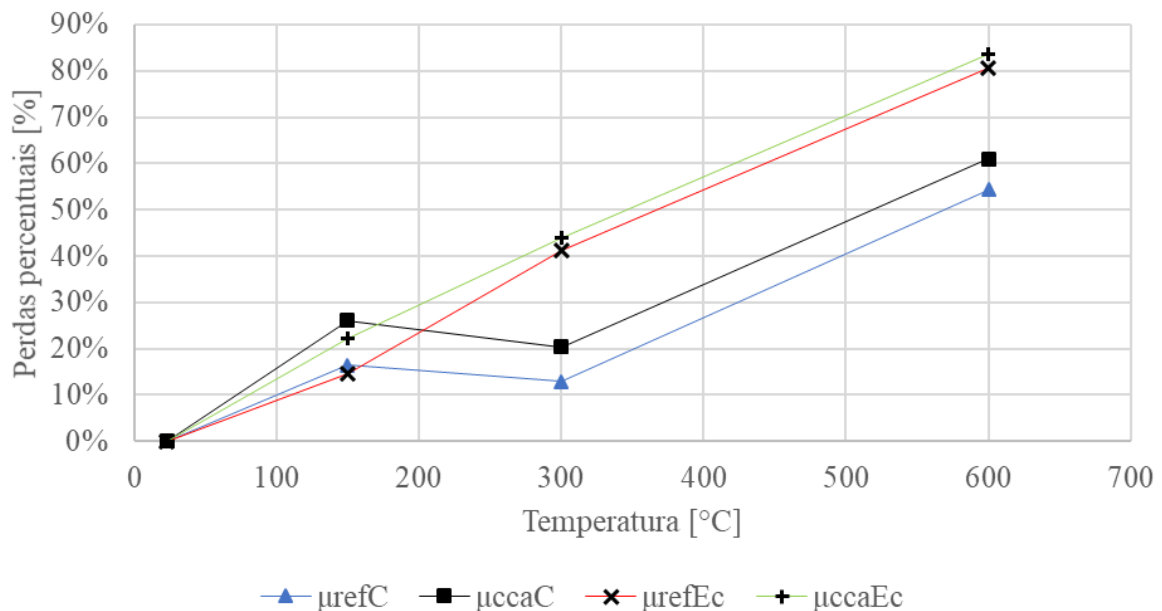
Figura 39 - Curvas de módulos de elasticidade residual em altas temperaturas



(Fonte: próprio autor)

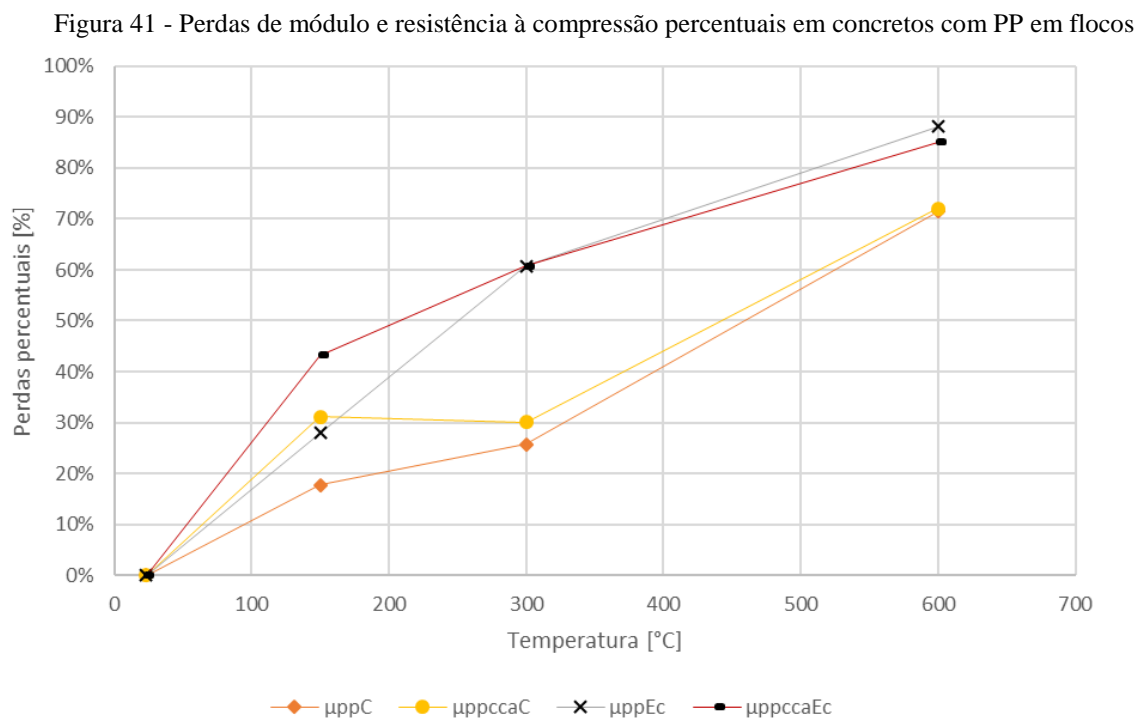
Nas figuras 40 e 41 pode ser visualizado o comportamento conjunto de perda percentual mecânica dos quatro traços de concreto. O conjunto sem adição de flocos de PP apresenta o decréscimo do módulo maior após o patamar de 150°C (figura 40), o que vai ao encontro de Neville (1997), pois após a temperatura de 121°C o decréscimo de módulo é progressivamente sensível em comparação com a resistência à compressão em altas temperaturas.

Figura 40 - Perdas de módulo e resistência à compressão em concretos sem PP em flocos



(Fonte: próprio autor)

A substituição parcial em volume da areia pelo floco de PP sugere um comportamento menos convergente em termos de perdas percentuais no que tange ao módulo de elasticidade em faixas de temperaturas menores avaliadas nos experimentos. Como contraponto aos concretos sem flocos, os concretos com adições de PP apresentam indicativos de que o baixo módulo de elasticidade do material pode influenciar o módulo de elasticidade de concretos em temperaturas abaixo dos 121°C. Essa tendência de comportamento mecânico é visualizada na figura 41.



(Fonte: próprio autor)

5.4 ENSAIO DE ABSORÇÃO E ÍNDICE DE VAZIOS

A tabela 17 apresenta os valores de absorção e índice de vazios dos corpos de prova dos experimentos. Na tabela 18 são apresentadas suas médias e desvios-padrão após a exposição às temperaturas propostas.

Tabela 17 - Resultados de absorção percentual dos quatro traços de concreto

T°C	Referência			10% PP			20% CCA			10% PP - 20% CCA		
	CP	A(%)	Iv(%)	CP	A(%)	Iv(%)	CP	A(%)	Iv(%)	CP	A(%)	Iv(%)
600	4	8,58	20,07	10	10,38	23,33	2	9,04	20,65	1	10,78	23,66
600	6	8,83	20,49	11	10,33	23,26	6	8,82	20,23	5	10,41	23,06
600	7	8,69	20,25	12	10,45	23,43	10	8,93	20,45	12	9,96	22,34
300	25	6,25	14,91	27	6,89	16,09	28	6,61	15,56	26	7,54	17,19
300	26	6,25	14,91	31	6,73	15,73	29	6,34	15,06	30	8,00	18,04
300	27	6,34	15,11	35	9,97*	21,70*	34	6,86	15,95	34	7,38	16,95
150	39	4,25	10,34	37	4,32	10,47	38	4,75	11,18	42	5,32	12,40
150	42	4,35	10,59	42	5,12	12,18	43	4,89	11,50	47	5,54	12,89
150	44	4,70	11,26	48	5,11	12,15	45	4,97	11,24	48	5,54	12,77
REF	13	4,33	10,55	13	4,30	10,33	13	4,35	10,33	13	4,78	11,12
REF	14	4,28	10,46	14	4,75	11,34	14	4,44	10,65	14	5,14	12,00
REF	15	4,58	11,11	15	4,74	11,35	15	4,38	10,59	15	4,84	11,30

* Valor descartado para o cálculo de média e desvio padrão

(Fonte: próprio autor)

Diferenciais acima de 20% da tendência média dos outros elementos do grupo foram desconsiderados, sendo, portanto, valores considerados impróprios para a representatividade da média.

Tabela 18 - Absorção e Índice de vazios – média e desvio-padrão (%)

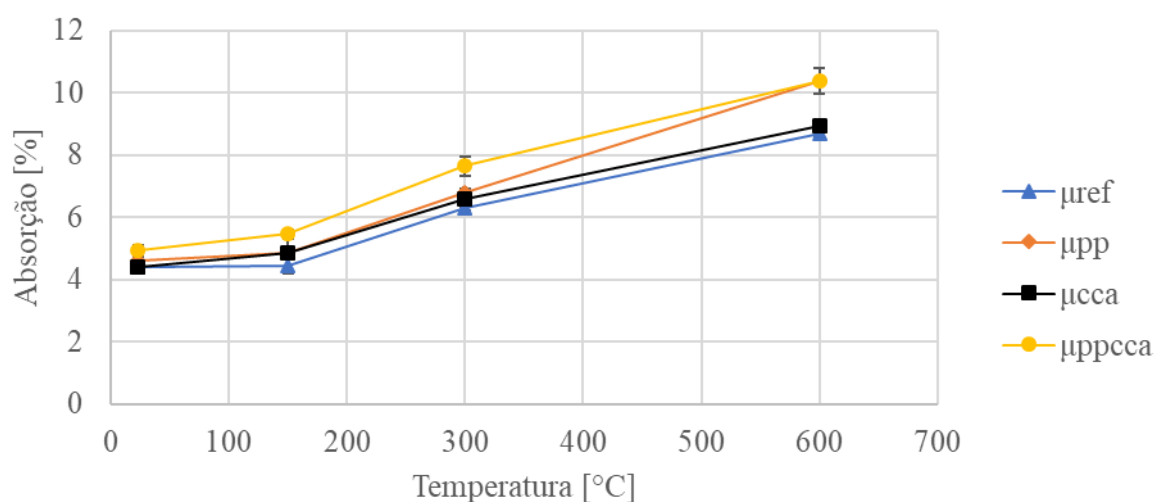
<i>Sem flocos</i>	Referência				20% CCA			
	A(%)		Iv(%)		A(%)		Iv(%)	
T[°C]	μ_{ref}	σ	μ_{ref}	σ	μ_{cca}	σ	μ_{cca}	σ
600	8,7	0,1	20,3	0,2	8,9	0,1	20,4	0,2
300	6,3	0,1	15,0	0,1	6,6	0,3	15,5	0,4
150	4,4	0,2	10,7	0,5	4,9	0,1	11,3	0,2
REF	4,4	0,2	10,7	0,4	4,4	0,0	10,5	0,2
<i>Com flocos</i>	10% PP				10% PP - 20% CCA			
	A(%)		Iv(%)		A(%)		Iv(%)	
T[°C]	μ_{pp}	σ	μ_{pp}	σ	μ_{ppcca}	σ	μ_{ppcca}	σ

600	10,4	0,1	23,3	0,1	10,4	0,4	23,0	0,7
300	6,8	0,1	15,9	0,3	7,6	0,3	17,4	0,6
150	4,8	0,5	11,6	1,0	5,5	0,1	12,7	0,3
REF	4,6	0,3	11,0	0,6	4,9	0,2	11,5	0,5

(Fonte: próprio autor)

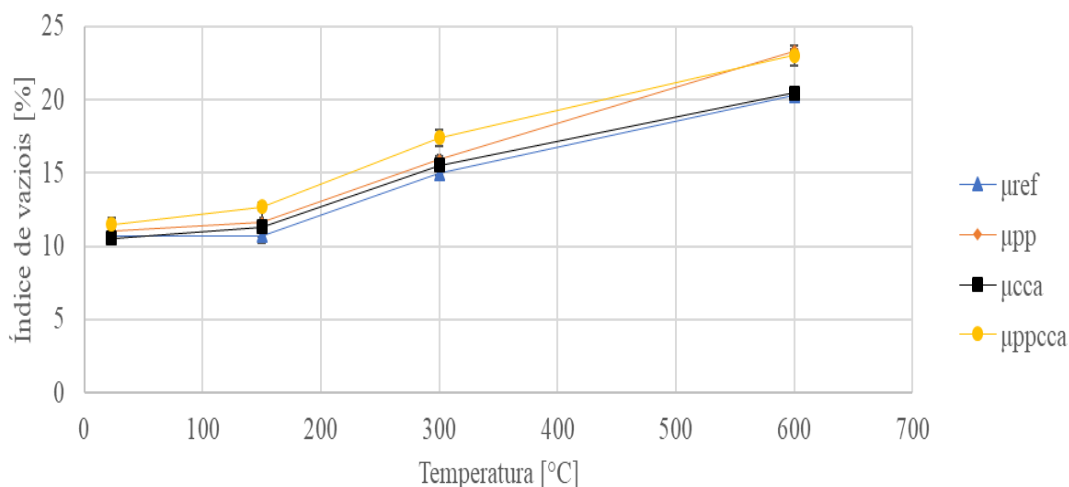
Nas figuras 42 e 43 está representada a tendência de aumento percentual de absorção e índice de vazios seguindo o aumento de temperatura para os quatro traços. Até a temperatura de 150°C, o traço com adição de CCA e o traço de concreto convencional indicaram comportamentos em torno da mesma faixa de variação não sugerindo alterações significativas. O traço com as adições de PP mostra indícios de uma tendência de maiores absorções e índices de vazios para todas as faixas de temperaturas. O comportamento desses traços com adições de flocos pode ser um indício de comportamento semelhante aos resultados encontrados por Bianchi (2015) em temperatura ambiente, porém em estudos com adições de fibras de PP e CCA em maior teor e moagem. Em seus resultados a presença de fibras aumentou a quantidade de poros, com possibilidade de criação de novos poros na zona de transição entre o polímero e a matriz. A tendência de o polímero em floco diminuir de tamanho ou sumir com o aumento de temperatura e assumir um comportamento semelhante ao das fibras poderia sugerir isto, considerando que os resultados apresentaram comportamento semelhante também em índice de vazios.

Figura 42 – Absorção percentual média em função da temperatura



(Fonte: próprio autor)

Figura 43 - Curvas de índice de vazios percentual média em função da temperatura



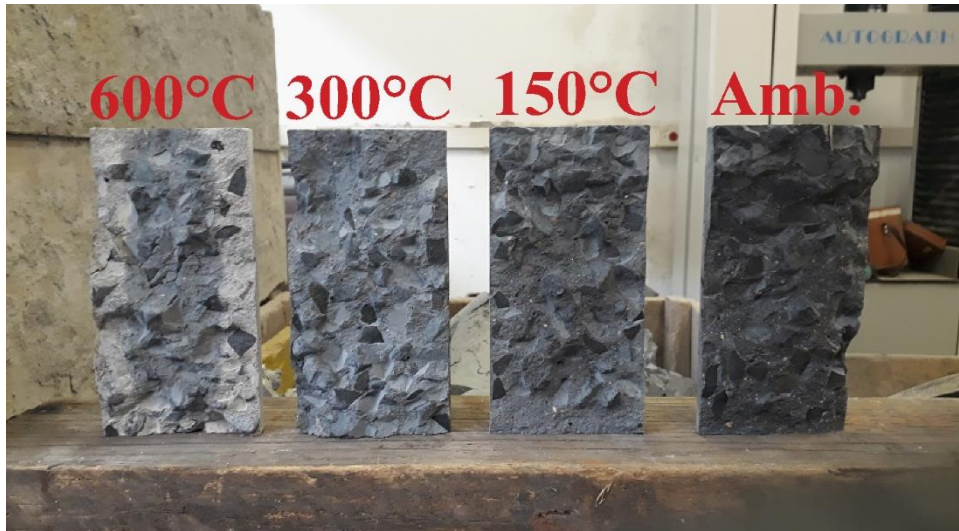
(Fonte: próprio autor)

Os aumentos de absorção e índice de vazios até 150°C indicam evaporação da água livre dos poros. No entanto, o aumento de porosidade a partir da faixa de 300°C em parte se deve à perda de C-S-H, mas pode demonstrar também o efeito das adições de polipropileno. O patamar de temperatura demonstra um comportamento em termos de resultados de absorção e índice de vazios incoerente com os resultados de resistência à compressão, pois esses aumentos de porosidade deveriam estar atrelados a uma diminuição em termos de resistência, o que por algum motivo não aconteceu.

O comportamento da cinza sem controle de queima poderia indicar, além de uma reação pozolânica lenta com efeitos significativos em questão de resistência e colmatção de poros somente em idades bastante avançadas, também uma possível perda de matéria orgânica, indo ao encontro dos resultados e conclusões encontrados por Almeida (2017) quando, em seus estudos, comparou-se uma cinza sem controle de queima com outra industrialmente controlada. De certa forma, porém, para os resultados em 300 e 600°C, o traço CCAPP, que já apresentava aparentes ganhos consecutivos de porosidade frente aos demais traços em todos os patamares de temperatura, demonstra um comportamento sugestivamente semelhante ao traço de PP em 600°C, o que pode sugerir que uma fração suscetível à percolação e porosidade na zona de transição foi influenciada pela adição dos flocos de PP. Esse indício iria ao encontro de estudos com concretos com adição do polímero em forma de fibra em resultados obtidos por Bentz, (2000). No entanto, é importante ressaltar que esse patamar acima de 400°C é a temperatura em que ocorrem as fortes decomposições dos silicatos hidratados de cálcio e do hidróxido de cálcio, gerando fissuras na matriz e o aumento de volume dos poros (SANTOS, 2012).

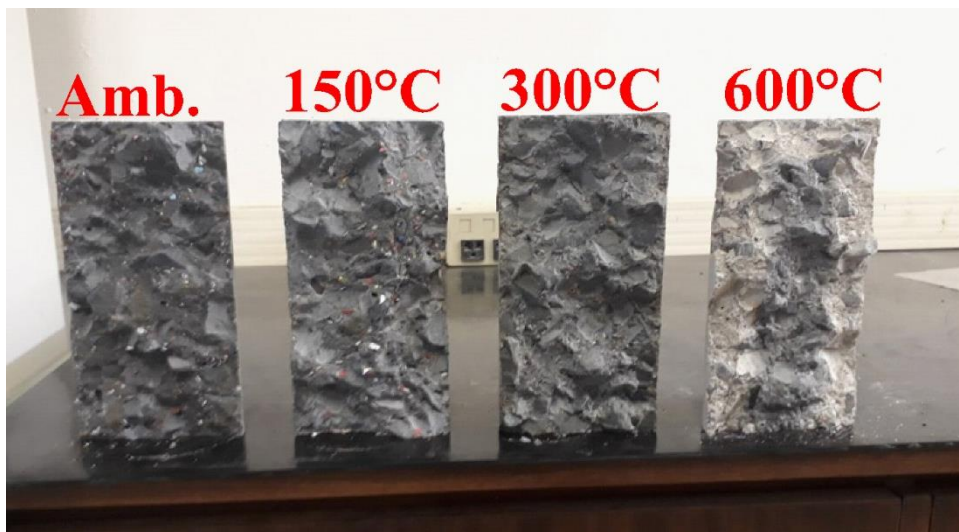
Nas figuras 44 e 45 é possível observar a amostras da elevação de temperatura nos traços com CCA.

Figura 44 – Degradação com o aumento de temperatura do traço cca



(Fonte: próprio autor)

Figura 45 - Degradação com o aumento de temperatura do traço cca pp



(Fonte: próprio autor)

6 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Para os ensaios realizados neste trabalho o comportamento dos concretos em situação de compressão axial demonstrou uma cisão. Todos os traços perderam resistência de maneira significativa no patamar de 600°C, porém a trajetória até essas perdas aparentou ser, de maneira geral, influenciada pela adição dos flocos. O traço de concreto com adição de floco de polipropileno, por exemplo, foi o único traço que não demonstrou ganho de resistência a 300°C, talvez por uma representatividade maior da perda de resistência devido à substituição em volume de agregado miúdo em frações da pasta.

Dessa forma, no caso dos traços com adição de polipropileno, até a faixa de 300°C sugere-se que a queda mais acentuada se deu na compressão, o que pode ser um indicativo de que os flocos de polipropileno contribuem para uma perda menos brusca de resistência à tração por compressão diametral enquanto não há o derretimento do polímero aos 165°C. A elevação de temperatura aos 600°C, no entanto, a tendência aparente de resistência à tração é a de retorno à perda maior de resistência relativa à inicial em comparação com a compressão. Isso pode ser indícios, para o tempo de exposição desta pesquisa, de que o derretimento do floco tenha ocorrido por completo tanto externa quanto internamente da matriz, formando novos poros e fissuras.

Os resultados de módulo de elasticidade com as elevações de temperatura propostas demonstraram um comportamento esperado, para os traços sem flocos de PP, com perdas de cerca de 90% em comparação ao seu valor inicial. Para os traços com flocos de PP, em termos de desempenho mecânico, o módulo também decresce de maneira acentuada quando comparado à compressão axial e consigo mesmo ao longo das temperaturas, porém apresenta reduções iniciais nas temperaturas quando comparado aos traços de concreto convencional e com adição de cinza, sugerindo um comportamento compatível com a adição de um polímero com baixo módulo de deformação. O traço com adição de PP apresentou perdas em torno de 30% para cada aumento de patamar de temperatura, podendo sugerir um comportamento a ser investigado com outros teores de adição e temperaturas.

Em termos de indicativos de durabilidade, os flocos sugerem uma participação interessante no acréscimo tanto de índice de vazios e absorção, sendo os dois patamares finais de temperatura afetados de maneira semelhante e próximas aparentemente. Em termos das temperaturas ambiente e 150°C, os valores que mostraram variabilidade maior foram os de absorção,

mantendo-se relativamente estáveis os valores de índice de vazios. O efeito das adições de flocos na zona de transição podem ser relevantes e devem ser estudados mais criteriosamente. O desempenho mecânico geral do traço com adição de 20% de cinza de casca de arroz na temperatura ambiente se mostrou interessantíssimo, pois foi aplicada uma cinza sem controle de queima e com um elevado teor de substituição em volume de concreto, apresentando resultados de resistência à compressão, tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade na mesma faixa de variação do concreto, isto é, esta cinza apresenta um boa aplicabilidade. Com relação ao seu desempenho em altas temperaturas, suas variações também acompanharam os resultados de concreto, o que também pode ser analisado de maneira positiva, pois agregou-se a cinza como um produto cimentante, então um comportamento similar é o desejável.

O comportamento dos concretos com floco de polipropileno no que diz respeito a desempenho mecânico também se mostrou bom, diferentemente da situação de incêndio. Esse resíduo foi inserido ao concreto como adição pós-consumo sem nenhum tratamento especial, a não ser a moagem em moinho de facas. Os resultados de perda de desempenho mecânico foram expressivos, porém ainda se apresenta como um concreto estrutural de elevadas resistências, sendo um material possível para substituir o agregado miúdo, um recurso não renovável.

Por fim, em termos de sugestões para trabalhos futuros com estes resíduos, sugere-se teores mais baixos de água / aglomerante com taxas mais elevadas de acréscimo de temperatura, explorando um potencial conhecido em termos de fibras de polipropileno, a diminuição de deslocamentos explosivos. Estudos exploratórios com estas adições também podem ser interessantes no sentido de melhor compreensão do decréscimo de propriedades mecânicas na faixa de temperatura entre 100 e 200°C, mas na aplicação em concreto armado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. M. A. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca**. 2017. 340 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- AMASS, W.; AMASS, A.; TIGHE, B. A Review of Biodegradable Polymers: Uses, Current Developments in the Synthesis and Characterization of Biodegradable Polyesters, Blends of Biodegradable Polymers and Recent Advances in Biodegradation Studies. **Polymer International**, n. 47, p.89-144, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13230**: Embalagens e acondicionamentos plásticos recicláveis - Identificação e simbologia. Rio de Janeiro, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto - Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. London: Taylor e Francis, 2007.
- BENTZ, D. P.. Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete. **ACI Materials Journal**, p. 351-359. jun. 2000.
- BRITEZ, C. A. **Avaliação de pilares de concreto armado colorido de alta resistência, submetidos a elevadas temperaturas**. 2011. 252 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BUCHANAN, Andrew H.; ABU, Anthony Kwabena. **Structural Design for Fire Safety**. 2. ed. New Zealand: Chichester: Jhon Wiley & Sons Ltda, 2017.

CANELLAS, S. S. **Reciclagem de PET, visando a substituição de agregado miúdo em argamassas**. 2005. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileiro de grãos. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 14 maio 2019.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação o índice de amorfismo da cinza da casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CORREA, P. M. **Concreto estrutural ambientalmente sustentável com inclusão de resíduos de cinza de casca de arroz e polipropileno**. 2019. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

CORREA, P. M. **Estudo comparativo da influência da adição de pet e pp pós-consumo na produção do concreto estrutural**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

COSTA, C. N.; FIGUEIREDO, A. D.; SILVA, V. P. Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas. In: NUTAU'2002 - SUSTENTABILIDADE, ARQUITETURA, DESENHO URBANO, 7., 2002, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Nutau', 2002.

COSTA, F. B. P. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

DIAS, L. A. M. **Estruturas de aço - Conceitos, técnicas e linguagem**. 4. ed. São Paulo: Editora Ziguarte, 1998.

NEOMATEX, P. Efeito "anti-spalling" das fibras de polipropileno. Publitec: Neomatex, Taboão da Serra, v. 1, n. 6, p.1-4, jan. 2008.

FERNANDES, B. L.; DOMINGUES, A. J. Caracterização Mecânica de Polipropileno Reciclado para a Indústria Automotiva. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Curitiba, v. 2, n. 17, p.85-87, dez. 2006.

TRIFIRÒ, F. Società Chimica Italiana. La chimica e L'industria: Il cinquantenario di un Premio Nobel e il polipropilene. 2013. Disponível em: <https://www.soc.chim.it/en/riviste/chimica_industria/rivista/2013/1>. Acesso em: 24 jan. 2019.

GCP, A. T. Tec-flow: Aditivo superplastificante para concreto. Disponível em: <<https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/tec-flow>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

GRAEFF, A. G.; DESIR, J. M.; SILVA FILHO, L. C. P. Noções Básicas Sobre Segurança contra Incêndio: Porto Alegre: Leme, 2019. 89 slides. Disponível em: https://moodle.ufrgs.br/pluginfile.php/2796729/mod_resource/content/1/Aula%2002%20-%20SCI.pdf. Acesso em: 15 maio 2019.

GRIMM, A. M. Meteorologia Básica - Notas de Aula. Curitiba: Departamento de Física, 1999. Disponível em: <<https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acesso em: 14 maio 2019.

JAMES, J.; RAO, M. S. Reactivity of rice husk ash. **Cement and Concrete Research**, Bangalore, v. 16, n. 3, p.296-302, 30 jan. 1986.

LANDI, F. R. **Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado**. São Paulo: Companhia de Cimento Portland Itaú, 1986.

LIMA, R. C. A. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. 241 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; SILVA FILHO, L. C. P. Efeito das altas temperaturas no concreto. In: SEMINÁRIO DE PATOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES, 2., 2004, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Leme, 2004.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; SILVA FILHO, L. C. P. Variação das propriedades mecânicas de concretos convencionais e de alta resistência em temperaturas elevadas. **Concreto & Construções**, São Paulo, v. 46, p.65-68, abr. 2007.

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

MONTEIRO, H. B. S. **Estudo das propriedades mecânicas residuais do concreto de alta resistência submetido a altas temper.** 2017. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda., 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini Ltda., 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. São Paulo: Bookman Editora Ltda., 2016.

NINCE, A.; FIGUEIREDO, A.; BITTENCOURT, T. Absorção e Índice de Vazios em Concreto Reforçado com Fibra de Polipropileno Exposto a 400° C e 600° C. In: SIMPÓSIO, 5., 2003, São Paulo. **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003. p. 1 - 10.

PENG, Gai-fei et al. Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete s. **Cement And Concrete Research**, v. 36, n. 4, p.723-727, abr. 2006.

POON, Chi-sun; AZHAR, Salman. Deterioration and Recovery of Metakaolin Blended Concrete Subjected to High Temperature. **Fire Technology**, v. 1, n. 39, p.35-45, mar. 2003.

POUEY, Maria Tereza Fernandes. **Beneficiamento da cinza de casca de arroz residual com vistas a produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 320 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PRUDENCIO JUNIOR, L. R.; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. Cinza da casca de arroz. In: ROCHA, Janaíde Cavalcante; JOHN, Vanderley M. (Ed.). **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional**. Porto Alegre: Antac, 2003. p. 240-261.

RIGHI, Débora Pedroso. **Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz**. 2015. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. P. (Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Campinas, v. 19, n. 2, p.121-132, jan. 2009.

SANTOS, C. C. **propriedades mecânicas residuais após incêndio de betões normais**. 2012. 208 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Coimbra, Coimbra.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D. (Ed.). **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496 p.

SILVA, E. J.; TASHIMA, M. M.; AKASAKI, J. L. Estudo de reações expansivas em argamassas de cimento Portland com cinza de casca de arroz (cca). **Holos Environment**, Ilha Solteira, v. 7, n. 1, p.72-86, 12 jun. 2007.

SOUZA, Adriana Aparecida Ambrosio de. **Influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas do concreto submetido ao fogo**. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SPINACÉ, M. A. S.; PAOLI, M. A. A Tecnologia da Reciclagem dos Polímeros. **Quim. Nova**, Campinas, v. 28, n. 1, p.65-72, jun. 2004.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento portland**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

TIBONI, R. **A utilização da cinza da casca de arroz de termoelétrica como componente do aglomerante de compósitos à base de cimento portland**. 2007. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos.

VARGAS, M. R.; SILVA, V. P. **Resistência ao Fogo das Estruturas de Aço**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/centro Brasileiro da Construção em Aço, 2003.

VELASCO, R. V. **Concreto de alto desempenho reforçado com fibras de polipropileno e sisial submetido a altas temperaturas.** 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.