

**UDESC**

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

O presente trabalho tem como objetivo estudar as propriedades de concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas. Foi desenvolvido um concreto convencional e concretos de alto desempenho com adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de microfibras de polipropileno. As misturas desenvolvidas foram submetidas às temperaturas de 100°C, 200°C e 300°C, durante 60 minutos. Ficou comprovado que o comportamento do concreto convencional é bem superior ao CAD, especialmente a mistura sem fibras. As microfibras de polipropileno foram extremamente importantes para minimizar a redução da resistência à compressão.

Orientador: Carmeane Effting

Coorientador: Itamar Ribeiro Gomes

JOINVILLE, 2019

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO
REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE
POLIPROPILENO E SUBMETIDOS A ELEVADAS
TEMPERATURAS**

DEBORA GANASINI

JOINVILLE, 2019

DEBORA GANASINI

**CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADOS COM MICROFIBRAS DE
POLIPROPILENO E SUBMETIDOS A ELEVADAS TEMPERATURAS**

Dissertação de mestrado em Engenharia Civil
apresentado como requisito parcial para obtenção
do título de Mestre em Engenharia Civil pela
Universidade do Estado de Santa Catarina.
Orientadora: Dra. Carmeane Effting.
Coorientador: Dr. Itamar Ribeiro Gomes.

JOINVILLE - SC

2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Ganasini, Debora

Concretos de alto desempenho reforçados com
microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas
temperaturas / Debora Ganasini. -- 2019.

135 p.

Orientadora: Carmeane Effting

Coorientador: Itamar Ribeiro Gomes

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de
Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2019.

1. Concreto de alto desempenho. 2. Microfibras de
polipropileno. 3. Concreto reforçado com fibras. 4. Resistência
à compressão. I. Effting, Carmeane. II. Gomes, Itamar
Ribeiro. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro
de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. IV. Título.

**Concretos de Alto Desempenho Reforçados com Microfibras de Polipropileno
e Submetidos a Elevadas Temperaturas**

por

Debora Ganasini

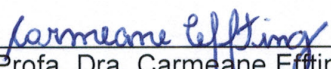
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL


Área de concentração em "Engenharia Urbana e da Construção Civil"
e aprovada em sua forma final pelo

**CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.**

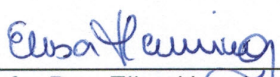
Banca Examinadora:



Profa. Dra. Carmeane Effting
CCT/UDESC (Orientadora/Presidente)



Profa. Dra. Marianna Ansiliero de
Oliveira Coelho Lorencet
HZ University of Applied Sciences



Profa. Dra. Elisa Henning
CCT/UDESC

Joinville, SC, 18 de novembro de 2019.

Dedico este trabalho a meus pais,
Alexandre e Glaci, com todo o amor e
carinho. Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo discernimento e força concedidos durante toda esta caminhada.

Aos meus pais, Alexandre e Glaci, por todo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao meu namorado Caetano, por todo o apoio durante o mestrado e grande parte da graduação.

À professora orientadora, Carmeane Effting, por toda a dedicação e incentivo no desenvolvimento do tema e principalmente pela amizade construída durante todos esses anos.

Ao professor coorientador Itamar Ribeiro Gomes e os alunos Meise e Guilherme, pela colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da UDESC-CCT, pela utilização do Laboratório de Materiais de Construção Civil, que foi de grande importância para a realização da parte experimental deste trabalho. Em especial, ao Adilson Schackow, pelas boas conversas e por todo o suporte durante os trabalhos em laboratório.

Ao aluno João Pedro Bittencourt, que auxiliou durante a toda produção dos concretos, tornando possível a realização desta pesquisa.

As indústrias BASF, MC-Bauchemie e Neomatex, pelo fornecimento de aditivos, adições minerais e fibras para a pesquisa.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de estudos durante todo o período de realização da pesquisa.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa, muito obrigada!

RESUMO

Os concretos de alto desempenho (CAD) vêm sendo cada vez mais utilizados em edifícios altos e esbeltos. O material exibe uma permeabilidade baixa, o que é muito importante para garantir boas condições de durabilidade. No entanto, em situações de incêndio, isso se torna prejudicial para a estrutura, resultando em uma rápida deterioração do material e ocorrência do efeito *spalling*. Diante deste cenário, é importante estudar métodos para minimizar os efeitos deletérios devido à exposição do concreto em altas temperaturas. O presente trabalho tem como objetivo estudar as propriedades de concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas. Foi desenvolvido um concreto convencional, com resistência característica à compressão de 25 MPa e concretos de alto desempenho com adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de microfibras de polipropileno. Para a produção do CAD, foi utilizado brita de basalto, aditivo superplastificante, sílica da casca do arroz e sílica ativa em suspensão, adotando um fator água/materiais cimentícios de 0,26. Em temperatura ambiente, foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e térmicas, além de investigar a durabilidade dos concretos por meio de ataque por sulfato. As misturas desenvolvidas foram submetidas às temperaturas de 100°C, 200°C e 300°C, durante 60 minutos. Para o concreto com 2 kg/m³ de microfibras, também foram realizados ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade aos 200°C, 400°C e 600°C. Com relação aos resultados em temperatura ambiente, as propriedades mecânicas de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral não foram afetadas significativamente pela presença das fibras. A condutividade térmica foi bastante afetada pela porosidade do concreto. No entanto, a adição de fibras não influenciou nesta propriedade térmica, mesmo para teores elevados de polipropileno. Nos ensaios de durabilidade, tanto a resistividade elétrica como a variação de massa indicaram uma vida útil maior para o CAD, comparado com o concreto convencional. Na exposição dos concretos em elevadas temperaturas, ficou comprovado que o comportamento do concreto convencional é bem superior ao CAD, especialmente a mistura sem fibras. As microfibras de polipropileno foram extremamente importantes para minimizar a redução da resistência à compressão, sendo que os teores de 2 e 3 kg/m³ foram os mais efetivos. A evaporação das fibras de polipropileno após aquecimento resultou no surgimento de canais interligados, prevenindo a formação das zonas de alta pressão nos poros do concreto. A mistura que apresentou o melhor desempenho geral foi a que continha 2 kg/m³ de microfibras. Além de melhorar as propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, até 300°C, foram verificadas melhorias na resistência à tração por compressão diametral, sem afetar a resistência à compressão e a trabalhabilidade do material.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho. Microfibras de polipropileno. Concreto reforçado com fibras. Elevadas temperaturas. Resistência à compressão.

ABSTRACT

High performance concretes (HPC) are increasingly used at tall and slender buildings. The material exhibits a low permeability, which is very important to ensure good durability. On the other hand, in fire situations, this results in a fast deterioration to the material and occurring of *spalling*. Given the scenario, it is important to study methods to minimize the deleterious effects related to concrete exposure at high temperatures. The present work aimed to study the properties of high performance concrete reinforced with polypropylene microfibers and submitted to high temperatures. A conventional concrete with a compressive strength of 25 MPa and high performance concretes with 1 kg/m³, 2 kg/m³ and 3 kg/m³ additions of polypropylene microfibers were produced. For the production of HPC, basalt gravel, superplasticizer additive, silica from rice husk and silica suspension were used, adopting a water/cementitious factor of 0.26. At room temperature, physical, mechanical and thermal properties were evaluated, besides investigating the durability of the concrete by sulfate attack. The mixtures were subjected to temperatures of 100°C, 200°C and 300°C, for 60 minutes. For the concrete with 2 kg/m³ of microfibers, compressive strength, splitting tensile strength and elastic modulus tests were also performed at 200°C, 400°C and 600°C. In relation to the results at room temperature, the mechanical properties of compressive strength and splitting tensile strength were not significantly influenced by the presence of fibers. Thermal conductivity was greatly affected by concrete porosity. However, the addition of fibers did not influence this thermal property, even at high fiber contents. In durability tests, both electrical resistivity and mass variation indicates a longer service life for HPC, compared to conventional concrete. In exposing concretes at high temperatures, it has been proven that the behavior of conventional concrete is far superior to HPC, especially the mixture without fiber. Polypropylene microfibers were extremely important in minimizing the reduction of compressive strength, where the contents of 2 and 3 kg/m³ were the most effective. The evaporation of polypropylene fibers after heating resulted in the emergence of interconnected channels, preventing the formation of high pressure zones in concrete pores. The mixture with the best overall performance was 2 kg/m³ of microfibers. In addition to improving mechanical properties at elevated temperatures, up to 300°C, improvements in splitting tensile strength have been found, without affecting the compressive strength and workability of the material.

Keywords: High performance concrete. Polypropylene microfibers. Fiber reinforced concrete. High temperature. Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Método de Wenner para medição da resistividade elétrica do concreto. .31	31
Figura 2 - Microfibras de polipropileno: (a) fibriladas; (b) monofilamento.....34	34
Figura 3 - Macrofibras de polipropileno disponíveis no mercado brasileiro.35	35
Figura 4 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras.38	38
Figura 5 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com reforço de fibras.38	38
Figura 6 - Dados referentes à resistência à compressão residual de concretos em elevadas temperaturas.....42	42
Figura 7 - Dados referentes à resistência à tração indireta residual de concretos em elevadas temperaturas.....44	44
Figura 8 - Efeito <i>spalling</i> no concreto.48	48
Figura 9 - Atuação das fibras de polipropileno no efeito <i>spalling</i>50	50
Figura 10 - Esquema com o programa experimental da pesquisa.52	52
Figura 11 - Esquema com os ensaios dos concretos no estado fresco e endurecido.53	53
Figura 12 - Curva granulométrica das areias média e grossa.54	54
Figura 13 - Curva granulométrica da areia misturada: 15% de areia média e 85% de areia grossa.....55	55
Figura 14 - Curva granulométrica das britas utilizadas no programa experimental. .56	56
Figura 15 - Sílica ativa da casca do arroz: (a) Aparência; (b) MEV com ampliação de 1800 vezes.57	57
Figura 16 - Sílica ativa em suspensão: (a) Aparência; (b) MEV com ampliação de 1800 vezes.58	58
Figura 17 - Corpos de prova do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland. (a) argamassa de referência; (b) argamassa com 25% de substituição de sílica ativa em suspensão.60	60
Figura 18 - Resultados do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: (a) Sílica da casca do arroz; (b) Sílica ativa em suspensão.61	61
Figura 19 - Microfibras de polipropileno: (a) Aparência; (b) MEV com ampliação de 600 vezes.....62	62
Figura 20 - Análise térmica das microfibras de polipropileno.63	63
Figura 21 - Ensaio de abatimento do tronco de cone. (a) CC; (b) CAD.....67	67
Figura 22 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) posicionamento do corpo de prova na prensa hidráulica; (b) corpo de prova rompido.69	69
Figura 23 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade: (a) Extensômetro; (b) posicionamento no corpo de prova.70	70
Figura 24 - Arranjo experimental para a medição da condutividade térmica.71	71

Figura 25 - Detalhe dos corpos de prova utilizados para o ensaio da resistividade elétrica.....	73
Figura 26 - Esquema do circuito utilizado para o ensaio de resistividade elétrica....	74
Figura 27 - Esquema do aquecimento dos corpos de prova.	75
Figura 28 - Procedimentos de otimização do traço dos concretos de alto desempenho.....	78
Figura 29 - Calor de hidratação gerado pelo CC e CAD.	86
Figura 30 - Resultados da resistência à compressão em temperatura ambiente.	89
Figura 31 - Intervalos de confiança <i>Bootstrap</i> de 95% para a resistência à compressão.....	91
Figura 32 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral em temperatura ambiente.	92
Figura 33 - Intervalos de confiança <i>Bootstrap</i> de 95% para a resistência à tração indireta.	95
Figura 34 - Variação de massa dos concretos após ataque por sulfato.	96
Figura 35 - Concreto convencional após ataque por sulfato: (a) Face lateral; (b) Face inferior.	97
Figura 36 - Concreto de alto desempenho após ataque por sulfato.	98
Figura 37 - Resultados da resistividade elétrica dos concretos.....	98
Figura 38 - Microestrutura do concreto de alto desempenho com ampliação de 33 vezes.....	99
Figura 39 - Interface pasta-agregado com ampliação de 4000 vezes.	100
Figura 40 - Interface da fibra com a matriz cimentícia. Ampliação de 1000 vezes.	101
Figura 41 - Micrografia do concreto CAD.2 com ampliação de 350 vezes.	101
Figura 42 - Espectro EDS do local 1.	102
Figura 43 - Espectro EDS do local 2.	103
Figura 44 - Explosão da mistura CAD em 400°C.	104
Figura 45 - Resistência à compressão dos concretos em diferentes temperaturas.	105
Figura 46 - Coeficientes de redução da resistência à compressão em diferentes temperaturas.	106
Figura 47 - Perda de massa dos concretos em diferentes temperaturas.	108
Figura 48 - Aparência dos corpos de prova da mistura CAD.2 em diferentes temperaturas.	109
Figura 49 - Perda de massa da mistura CAD.2.....	110
Figura 50 - Resistência à compressão em diferentes temperaturas: CAD.2.	111
Figura 51 - Coeficientes de redução à resistência à compressão: CAD.2.....	111
Figura 52 - Resistência à tração por compressão diametral em diferentes temperaturas: CAD.2.....	113
Figura 53 - Coeficientes de redução à resistência à tração indireta: CAD.2.	113
Figura 54 - Curvas de tensão-deformação longitudinal em função da temperatura: CAD.2.....	115

Figura 55 - Curvas de tensão-deformação transversal em função da temperatura: CAD.2.....	115
Figura 56 - Coeficientes de redução do módulo de elasticidade: CAD.2.....	117
Figura 57 - Microestrutura da mistura CAD.2. (a) T. amb; (b) 200°C; (c) (d) 400°C; (e) (f) 600°C.	118
Figura 58 - Canais interligados formados pela evaporação do polipropileno em 600°C (1500 vezes).....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Critérios de classificação do CAD segundo a FHWA.....	23
Tabela 2 - Resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função da relação água/cimento.	27
Tabela 3 - Modelos de regressão para determinação da resistência à tração por compressão diametral com base na resistência à compressão de concretos.....	29
Tabela 4 - Condutividade térmica de acordo com a NBR 15220/2005.	30
Tabela 5 - Avaliação do potencial de corrosão por meio da resistividade elétrica do concreto.	32
Tabela 6 - Modelos de regressão para a resistência à compressão em diferentes faixas de temperatura.....	43
Tabela 7 - Modelos de regressão para a resistência à tração em diferentes faixas de temperatura.....	44
Tabela 8 - Modelos de regressão para o módulo de elasticidade em temperatura ambiente.	45
Tabela 9 - Modelos de regressão para o módulo de elasticidade em diferentes temperaturas.	46
Tabela 10 - Traços de concreto analisados nesta pesquisa.	52
Tabela 11 - Composição química da sílica da casca de arroz e da sílica ativa em suspensão.....	58
Tabela 12 - Verificação das propriedades químicas da sílica da casca de arroz e da sílica ativa em suspensão de acordo com a NBR 12653 e ASTM C618-17.	59
Tabela 13 - Quantidade de material, em massa, para realização do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland da sílica da casca do arroz.....	60
Tabela 14 - Propriedades físicas das microfibras de polipropileno.	62
Tabela 15 - Dosagem dos materiais utilizados para confecção de 1 m ³ de concreto.	64
Tabela 16 - Quantidade de corpos de prova para cada traço.	66
Tabela 17 - Traços avaliados na etapa de otimização.....	79
Tabela 18 - Comparação entre os concretos produzidos com gnaiss e basalto.....	82
Tabela 19 - Mistura final selecionada para confecção dos concretos de alto desempenho.....	84
Tabela 20 - Resultados do abatimento de tronco de cone das misturas analisadas.....	85
Tabela 21 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	88
Tabela 22 - Resultados da ANOVA da resistência à compressão.	90
Tabela 23 - Previsão de resultados da resistência à compressão com base no Eurocode 2.....	91
Tabela 24 - Resultados da ANOVA da resistência à tração por compressão diametral.	93

Tabela 25 - Previsão da resistência à tração indireta por diversos modelos de regressão.	94
Tabela 26 - Resultados da condutividade térmica dos concretos.	95
Tabela 27 - Composição química do local 1.	102
Tabela 28 - Composição química do local 2.	103
Tabela 29 - Comparação dos coeficientes de redução obtidos experimentalmente com os valores propostos pelo Eurocode 2.	107
Tabela 30 - Previsão da resistência à compressão do CAD.2 em diferentes temperaturas.	112
Tabela 31 - Previsão da resistência à tração indireta do CAD.2 em diferentes temperaturas.	114
Tabela 32 - Resultados do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em diferentes temperaturas.	116
Tabela 33 - Previsão do módulo de elasticidade do CAD.2 em temperatura ambiente.	116
Tabela 34 - Previsão da variação do módulo de elasticidade do CAD.2 em altas temperaturas.	117

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA	18
1.2	OBJETIVOS	20
1.2.1	Objetivo geral.....	20
1.2.2	Objetivos específicos.....	20
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	22
2.1	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO	22
2.1.1	Dosagem do CAD	24
2.1.2	Propriedades do CAD	26
2.1.2.1	Calor de hidratação	26
2.1.2.2	Resistência à compressão	27
2.1.2.3	Resistência à tração indireta	28
2.1.2.4	Condutividade térmica.....	29
2.1.2.5	Resistividade elétrica do concreto	30
2.1.2.6	Durabilidade do concreto e ataque por sulfato	32
2.2	CONCRETOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO	33
2.2.1	Fibras de polipropileno.....	34
2.2.2	Propriedades do concreto de alto desempenho com fibras de polipropileno.....	36
2.2.2.1	Trabalhabilidade	36
2.2.2.2	Resistência à compressão	36
2.2.2.3	Resistência à tração	37
2.2.2.4	Condutividade térmica.....	39
2.3	EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	40
2.3.1	Mecanismos físicos de degradação	40
2.3.2	Mecanismos químicos de degradação	40
2.3.3	Propriedades mecânicas de concretos submetidos a elevadas temperaturas.....	41
2.3.3.1	Resistência à compressão	41
2.3.3.2	Resistência à tração indireta	43
2.3.3.3	Módulo de elasticidade.....	45
2.3.4	Concreto de alto desempenho em elevadas temperaturas	46
2.3.5	Efeito <i>spalling</i>.....	47
2.3.6	Fibras de polipropileno em altas temperaturas	49
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	52
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	53

3.1.1	Cimento Portland.....	54
3.1.2	Agregado miúdo	54
3.1.3	Agregado graúdo.....	56
3.1.4	Água	57
3.1.5	Aditivo superplastificante.....	57
3.1.6	Sílica ativa	57
3.1.7	Fibras de polipropileno	61
3.2	DOSAGEM	63
3.3	EXECUÇÃO DOS CONCRETOS.....	64
3.3.1	Produção dos concretos	65
3.3.2	Moldagem dos corpos de prova.....	65
3.3.3	Adensamento.....	66
3.3.4	Cura	66
3.4	ENSAIOS NO ESTADO FRESCO.....	67
3.4.1	Abatimento de tronco de cone	67
3.4.2	Calor de hidratação	67
3.5	ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO	68
3.5.1	Propriedades físicas	68
3.5.2	Propriedades mecânicas	68
3.5.2.1	Resistência à compressão	68
3.5.2.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	68
3.5.2.3	Módulo de elasticidade.....	69
3.5.3	Propriedades térmicas.....	71
3.5.4	Resistividade elétrica do concreto	72
3.6	EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO	75
3.7	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	76
3.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA	76
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE 1	78
4.1	SELEÇÃO DO TRAÇO BASE	78
4.2	DOSAGEM DA SÍLICA ATIVA EM SUSPENSÃO	79
4.3	ESCOLHA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	80
4.4	DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE SECAGEM DA AREIA	81
4.5	SELEÇÃO DA BRITA	82
4.6	ESCOLHA DA MELHOR MISTURA PARA O CAD	83
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE 2	85
5.1	ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE	85
5.2	CALOR DE HIDRATAÇÃO.....	86
5.3	MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS...	87
5.4	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	89

5.5	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	92
5.6	CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	95
5.7	DURABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	96
5.8	MICROESTRUTURA.....	99
5.9	DEFINIÇÃO DE UMA POTENCIAL APLICAÇÃO PARA O CAD	103
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE 3	104
6.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ALTAS TEMPERATURAS.....	105
6.2	PERDA DE MASSA DOS CONCRETOS	108
6.3	CAD.2 SUBMETIDO AO AQUECIMENTO	109
6.3.1	Aspecto visual	109
6.3.2	Perda de massa	110
6.3.3	Resistência à compressão	111
6.3.4	Resistência à tração por compressão diametral	113
6.3.5	Módulo de elasticidade	115
6.3.6	Microestrutura	118
7	CONCLUSÕES	121
	REFERÊNCIAS.....	124

1 INTRODUÇÃO

O uso do Concreto de Alto Desempenho (CAD) em elementos estruturais está crescendo cada vez mais devido à sua elevada resistência à compressão e baixa permeabilidade. O CAD vem sendo bastante utilizado na execução de pilares de edifícios extremamente altos e esbeltos, possibilitando a diminuição da seção transversal e consequentemente proporcionando um melhor aproveitamento do espaço útil dos edifícios. Além disso, é possível reduzir a quantidade total de aço utilizada na estrutura, facilitando a execução da obra e reduzindo seus custos finais.

Até a década de 90, o principal critério adotado para avaliar o desempenho de uma mistura era a elevada resistência à compressão. Entretanto, a exposição a ambientes agressivos mostrou que este critério não era adequado para avaliar a durabilidade do material, visto que muitas estruturas recém-construídas já vinham apresentando grande deterioração (MEHTA; AITCIN, 1990).

O CAD surgiu na década de 90 com a premissa básica de proporcionar elevada durabilidade à estrutura. Trata-se de um tipo de concreto planejado para ser mais durável e, se necessário, mais resistente que o concreto convencional (ACI, 2011).

Para conseguir uma melhoria efetiva em suas propriedades, é necessário diminuir a permeabilidade da mistura. No entanto, isso pode fazer com que o concreto se torne mais vulnerável à retração e fissuração, além de ser potencialmente sujeito aos efeitos deletérios de elevadas temperaturas, reduzindo a vida útil da edificação.

Quando expostos a altas temperaturas, os materiais à base de cimento sofrem alterações físico-químicas que prejudicam suas propriedades mecânicas e comprometem sua durabilidade. O CAD tem um desempenho ao fogo inferior ao concreto convencional. A baixa permeabilidade, que é benéfica para considerações de durabilidade, torna-se prejudicial para o desempenho em condições de incêndio (KODUR, 2018; EIDAN *et al.*, 2019).

A matriz densa dos concretos de alto desempenho impede a saída do vapor de água gerado com altas temperaturas. Com isso, poro-pressões são geradas, levando a uma deterioração mais rápida e ao deslocamento de material na parte externa da estrutura (BANGI; HORIGUCHI, 2011; KODUR, 2014; CAETANO *et al.*, 2019).

Diante desses problemas, uma alternativa viável que vem sendo estudada para minimizar os efeitos de elevadas temperaturas no concreto é a adição de fibras de polipropileno. Este tipo de fibra permite uma redução da fissuração nas primeiras horas de cura e ainda atua significativamente na redução dos efeitos deletérios de altas temperaturas no CAD (BENTUR; MINDESS, 2007).

Quando aquecido, o polipropileno derrete e evapora, criando canais interligados que permitem a saída do vapor de água. Isso previne a formação das zonas de alta pressão nos poros do concreto e conseqüentemente reduz significativamente o efeito *spalling*, especialmente no concreto de alto desempenho (PLIYA; BEAUCOUR; NOUMOWÉ, 2011; ABAEIAN; BEHBAHANI; MOSLEM, 2018; LI; TAN; YANG, 2018).

1.1 JUSTIFICATIVA

A compreensão de que os danos causados a uma edificação durante um incêndio podem ser irreversíveis motiva o desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos efeitos de elevadas temperaturas em elementos estruturais. Esses estudos verificam a integridade de uma edificação e podem conduzir à descoberta e validação de materiais e técnicas que retardem ou reduzam a deterioração de uma estrutura pelo fogo. A correta seleção dos materiais constituintes de uma edificação pode garantir que a estrutura apresente segurança em condições reais de incêndio.

Na prática, apesar de toda a precaução na escolha do material mais adequado para a construção de uma estrutura, muitas vezes ainda persiste a ideia de que a utilização de um concreto de alto desempenho, com maior durabilidade e resistência mecânica, seja parâmetro suficiente para garantir uma longínqua vida útil. Muitos projetistas ignoram ou desconhecem o fato de que em uma situação de incêndio, por exemplo, o CAD não apresenta um desempenho adequado. Para reforçar este problema, ainda não existe nenhuma normatização brasileira específica para este tipo de concreto com relação ao fogo.

No Brasil, a NBR 15200 (ABNT, 2012a) estabelece os critérios para projetos de concreto armado em situações de incêndio. No entanto, a norma não indica as condições de resistência à compressão para utilização destes critérios, fazendo com que o CAD seja abordado da mesma maneira que o concreto convencional no critério de exposição em altas temperaturas.

A presente pesquisa analisa os reais efeitos no concreto de alto desempenho submetido a elevadas temperaturas, comparados com um concreto convencional. Além disso, foi proposto o uso de microfibras de polipropileno no CAD para minimizar a deterioração das estruturas.

A utilização deste tipo de fibras foi indicada com base em estudos científicos que comprovaram sua eficácia para diminuir o efeito de elevadas temperaturas no concreto (MAZZUCCO; MAJORANA; SALOMONI, 2015; XIONG; LIEW, 2015; SERRANO *et al.*, 2016; LI; TAN; YAO, 2018). No entanto, muitos destes estudos ainda se encontram em processo de desenvolvimento, sendo necessário ainda definir dosagens adequadas, que associem os benefícios em altas temperaturas, sem prejudicar as demais propriedades do material. Desta forma, esta pesquisa pode contribuir para preencher estas lacunas e complementar o que já foi estudado até o momento sobre o assunto.

Além das melhorias no desempenho do concreto com relação ao fogo, diversas outras vantagens foram consideradas para a escolha das microfibras de polipropileno. As fibras colaboram na ampliação da capacidade de deformação, rigidez, resistência ao impacto e no controle do processo de fissuração do concreto (PLIZZARI; MINDESS, 2019). Comparada com outros materiais disponíveis no mercado, as fibras de polipropileno são extremamente fáceis de aplicar no concreto, sem a formação de aglomerados, tornando viável sua utilização na prática. Apresentam a vantagem de ser inertes e sem riscos de corrosão, um problema comum nas fibras de aço. São extremamente leves e praticamente não influenciam no peso próprio da estrutura. O baixo custo do polipropileno torna a solução ainda mais interessante, aliando desempenho com baixo custo (BENTUR; MINDESS, 2006).

Outra inovação da pesquisa é a utilização de sílica ativa em suspensão em concretos de alto desempenho, um produto inovador para utilização em concretos e argamassas. Trata-se de uma suspensão estável de partículas de sílica ativa dispersas em água, o que facilita o seu manuseio e sua utilização. O alto teor de dióxido de silício no formato amorfo aliado a uma elevada finura proporciona altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, melhorando as propriedades de concretos tanto no estado fresco quanto no estado endurecido (MC BAUCHEMIE, 2016). O produto está disponível há pouco tempo no

mercado, desta forma ainda demanda mais pesquisas para potencializar seus benefícios em concretos.

Além do estudo de altas temperaturas, a pesquisa ainda apresenta uma análise geral das propriedades físicas, mecânicas e térmicas do concreto de alto desempenho, com e sem a adição de fibras de polipropileno em temperatura ambiente.

O CAD é um material com um potencial muito grande a ser explorado. E a adição de fibras de polipropileno é uma boa alternativa para melhorar ainda mais as suas propriedades.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar as propriedades de concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de polipropileno e submetidos a elevadas temperaturas.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do concreto convencional e dos concretos de alto desempenho sem fibras e com 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de microfibras de polipropileno;
- b) determinar as propriedades mecânicas e a microestrutura dos concretos após exposição em altas temperaturas;
- c) analisar o comportamento do concreto de alto desempenho ao ataque de sulfatos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em sete capítulos, conforme descrito a seguir. O primeiro capítulo apresenta uma breve introdução sobre o tema, a justificativa da pesquisa e os objetivos estabelecidos.

O segundo capítulo inclui uma abordagem geral sobre as características de concretos de alto desempenho e de concretos reforçados com fibras de polipropileno, enfatizando as propriedades que foram estudadas nesta pesquisa.

Também são apresentados conceitos e definições a respeito dos efeitos da alta temperatura no concreto.

O terceiro capítulo aborda os procedimentos metodológicos da pesquisa. São descritas as características dos materiais utilizados na pesquisa, a dosagem dos concretos estudados, os procedimentos realizados na execução dos concretos e os ensaios realizados no estado fresco e endurecido. Foi indicada também a metodologia para estudo do efeito de altas temperaturas no concreto.

Os resultados e discussões foram divididos em três fases. A fase 1, apresentada no quarto capítulo, corresponde ao estudo preliminar para otimização do traço do concreto de alto desempenho. A fase 2, descrita no quinto capítulo, inclui os resultados gerais da pesquisa. A fase 3 (sexto capítulo) apresenta os resultados da exposição dos concretos em altas temperaturas.

O sétimo capítulo apresenta as conclusões da pesquisa, baseadas nos resultados apresentados e discutidos nos três capítulos anteriores.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são abordadas as propriedades de concretos de alto desempenho e concretos com fibras de polipropileno. São apresentados também os conceitos referentes ao comportamento de concretos submetidos a elevadas temperaturas.

2.1 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

O Concreto de Alto Desempenho (CAD ou em inglês *High Performance Concrete* - HPC) é um material que apresenta seu comportamento em um patamar bem mais elevado do que os concretos convencionais. Além de grande resistência mecânica, ainda possui boa trabalhabilidade, qualidade estética, um bom acabamento e principalmente grande durabilidade (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

Na definição apresentada pelo *American Concrete Institute Committee* (ACI, 2011), trata-se de um concreto desenvolvido para ser mais durável e, se necessário, mais resistente que o concreto convencional. As misturas para CAD são compostas essencialmente dos mesmos materiais que as misturas de concreto convencionais, mas as proporções são definidas para fornecer a resistência e a durabilidade necessárias para as exigências estruturais e ambientais do projeto. Para o ACI, um concreto de alta resistência é definido como tendo resistência à compressão igual ou superior a 55 MPa.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu duas classes de concreto tendo como critério a resistência mecânica, não abrangendo o conceito de desempenho. Segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015), os concretos classificados no Grupo I devem apresentar valores de resistência à compressão entre 20 e 50 MPa. Já o Grupo II inclui resistências entre 55 até 100 MPa. A norma brasileira de concreto armado, a NBR 6118 (2014a), admite concretos com até 90 MPa de resistência.

Para incentivar a utilização do CAD, a *Federal Highway Administration* (FHWA) iniciou um programa nacional para utilização deste material na construção de pontes. O projeto propôs parâmetros de desempenho para estimar a durabilidade e resistência mecânica dos concretos utilizados em obras viárias. Desta maneira, a

FHWA classifica o CAD em três classes, conforme os parâmetros de desempenho apresentados na Tabela 1 (RUSSEL; GRAYBEAL, 2013).

Tabela 1 - Critérios de classificação do CAD segundo a FHWA.

Característica de desempenho	Método de ensaio	Classes de desempenho		
		Classe 1	Classe 2	Classe 3
Durabilidade Gelo-Degelo	AASHTO T161 ASTM C66/03	$70\% \leq PC < 80\%$	$80\% \leq PC < 90\%$	$P_c \geq 90\%$
Resistência à delaminação	ASTM C672/12	$2,0 < CS \leq 3,0$	$1,0 < CS \leq 2,0$	$CS \leq 1,0$
Resistência à abrasão	ASTM C944/12	$1,0 < CS \leq 2,0$	$0,5 < CS \leq 1,0$	$CS \leq 0,5$
Resistência de penetração de Cl^-	ASTM C1202/12 AASHTO T277	$1500 < CS \leq 2500$	$500 < CS \leq 1500$	$CS \leq 500$
Reatividade álcali-sílica	ASTM C441	$0,15 < CS \leq 0,20$	$0,10 < CS \leq 0,15$	$CS \leq 0,10$
Resistência a sulfatos	ASTM 1202	$RS < 0,10$ Até 6 meses	$RS < 0,10$ Até 12 meses	$RS < 0,10$ Até 18 meses
Abatimento/Fluidez	ASTM C 143 AASHTO T119	$SI > 190 \text{ mm}$ $SF < 500 \text{ mm}$	$500 < SF \leq 600 \text{ mm}$	$SF \geq 600 \text{ mm}$
Resistência à compressão	ASTM C 39 AASHTO T22/11	$55 \leq f_c < 69 \text{ MPa}$	$69 \leq f_c < 97 \text{ MPa}$	$f_c \geq 97 \text{ MPa}$
Módulo de Elasticidade	ASTM C 469 ASTM C 157	$34 \leq E_c < 41 \text{ GPa}$	$41 \leq E_c < 48 \text{ GPa}$	$E_c \geq 48 \text{ GPa}$
Retração	AASHTO T 160	$600 \leq S < 800$	$400 \leq S < 600$	$S \geq 400$
Fluência	ASTM C 512	$55 \leq R < 75 / \text{MPa}$	$30 \leq R < 55 / \text{MPa}$	$R \geq 30 / \text{MPa}$

Fonte: Russel e Graybeal (2013).

Tutikian, Isaia e Helene (2011) descreveram alguns princípios importantes que permitem melhorar as propriedades de resistência, trabalhabilidade e durabilidade de um concreto convencional, elevando-o ao patamar de alto desempenho. De maneira geral, é essencial a diminuição da porosidade, por meio da execução dos seguintes procedimentos:

- redução do fator água/cimento (a/c) e da quantidade total de água com o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes;

- diminuição do diâmetro máximo dos agregados graúdos e adequação da composição granulométrica dos agregados miúdos;
- incorporação de adições minerais como a sílica ativa, o metacaulim ou a cinza de casca de arroz para reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas.

As consequências diretas dessas ações correspondem à obtenção de uma microestrutura com poros de tamanho menor, diminuição da interconexão entre os poros e maior oposição à passagem de fluidos. O resultado final dessas ações simultâneas se traduz em aumento da compacidade, da resistência mecânica, da durabilidade, e, portanto, no desempenho do concreto (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

2.1.1 Dosagem do CAD

No geral, o CAD é composto por cimento, adições minerais, agregado miúdo e graúdo, água e aditivos químicos. Caso sejam necessárias propriedades específicas, ainda podem ser incorporados fibras ou pigmentos (TUTIKIAN; ISAIA; HELENE, 2011).

A escolha do cimento Portland deve ser definida em primeiro lugar, seguido da seleção do superplastificante, com ou sem retardador de pega. Posteriormente, é de suma importância a seleção dos agregados, visto que sua qualidade influencia muito à medida que a resistência à compressão cresce (AÏTCIN, 2000).

Deve ser observado também o valor da relação água/cimento a ser adotado. É essencial que o CAD seja dosado com fator a/c inferior a 0,40, sendo também indispensável à utilização de aditivos superplastificantes, de forma a garantir uma boa trabalhabilidade e elevada resistência mecânica. Os aditivos superplastificantes são praticamente obrigatórios no CAD, visto que melhoram a consistência do concreto sem aumentar a demanda de água, potencializando também a durabilidade e a resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de adições minerais também é muito importante devido à ação química e física que exercem no material. O tamanho reduzido das partículas permite um melhor empacotamento dos sólidos, preenchendo os espaços entre os grãos de cimento, o que diminui consideravelmente a porosidade do concreto e torna a microestrutura mais densa. A presença de adições minerais, geralmente

pozolânicas, melhoram também as propriedades reológicas da pasta, como coesão, fluidez, viscosidade e resistência à segregação, reduzindo ainda a tendência de exsudação. Quimicamente, as reações que ocorrem entre as adições minerais e o hidróxido de cálcio (CH) formam um composto semelhante ao silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aumentando a resistência mecânica do concreto (ACI, 2010; BOURCHY *et al.*, 2019).

A cinza da casca de arroz, em particular, é um material cimentício suplementar com um grande potencial devido à sua elevada disponibilidade e alta pozolanicidade. Em quantidades adequadas, oferece inúmeros benefícios ao concreto como o aumento na resistência à compressão, diminuição da porosidade, resistência ao ataque de sulfatos, ataque a ácidos e também a penetração de íons cloreto. Além de suas vantagens técnicas, a incorporação da cinza da casca de arroz no concreto tem um importante aspecto sustentável, visto que reduz os impactos ambientais com o aproveitamento deste resíduo agrícola na construção civil, evitando a sua disposição inadequada no meio ambiente e contribuindo também na redução do consumo de cimento Portland, responsável por enormes quantidades de CO₂ no meio ambiente (VASCONCELOS; AKASAKI, 2010; BARBOSA *et al.*, 2013; ALEX; DHANALAKSHIMI; AMBEDKAR, 2016; OLUTOGE; ADESINA, 2019).

Diversos estudos comprovaram a eficiência do uso da casca de arroz na produção de concretos de alto desempenho, exibindo melhorias significativas na resistência à compressão. Salas *et al.* (2009) verificaram que a resistência à compressão e a resistência à flexão de concretos com cinza de casca de arroz são semelhantes aos valores obtidos com sílica de fumo, ambos superiores às mesmas propriedades de concretos sem a adição de casca de arroz. Tuan *et al.* (2011) observaram que uma adição de 10% de cinza de casca de arroz permitiu a produção de concretos de alto desempenho com resistência à compressão superior do que a mistura de referência (sem a adição deste material pozolânico). O aumento na resistência à compressão em concretos com a adição deste resíduo também foi identificado por Kang *et al.* (2019). O aumento foi ainda mais expressivo em concretos com idades avançadas, com testes aos 91 dias.

Com relação à seleção dos agregados graúdos, deve-se tomar um cuidado especial, pois ao aumentar a resistência dos concretos, a fase agregado começa a

se tornar a parte mais frágil da mistura, muitas vezes limitando a resistência final do material (AL-ORAIMI; TAHA; HASSAN, 2006; NEVILLE, 2016).

Recomenda-se restringir seu diâmetro máximo no valor limite de 12,5 mm – 19 mm. A redução do tamanho frequentemente elimina os defeitos internos do agregado, tais como poros grandes, microfissuras e inclusões de minerais moles, reduzindo também a espessura e a porosidade da zona de transição (ACI, 2010; LI *et al.*, 2019).

Quanto aos agregados miúdos, Neville (2016) recomenda que eles sejam arredondados e uniformemente graduados, preferencialmente com módulo de finura entre 2,8 e 3,2. Aïtcin (2000) aborda valores semelhantes, entre 2,7 e 3,0, sem a presença de partículas finas, descartando-se os grãos inferiores a 5 mm.

2.1.2 Propriedades do CAD

É muito importante estudar as propriedades do concreto de alto desempenho, tais como: calor de hidratação, resistência à compressão, resistência à tração, condutividade térmica, resistividade elétrica e durabilidade.

2.1.2.1 Calor de hidratação

A taxa e a magnitude de geração do calor de hidratação do concreto dependem de inúmeros fatores, sendo os principais a quantidade de cimento utilizada, a finura do cimento, a utilização de adições minerais, a temperatura ambiente e a relação água/cimento adotada. Cada concreto deve ser estudado individualmente, buscando detectar os fatores que influenciam na origem da elevação da temperatura. Esses fatores precisam ser bem compreendidos para que possam ser tomadas medidas para controlar o aumento da temperatura e seus efeitos nas propriedades do concreto (ACI, 2007).

A utilização de cimentos mais finos, como o cimento CP V-ARI, acelera a reação de hidratação. O aumento da finura tem influência direta no aumento da área superficial, permitindo uma maior área de contato entre o cimento e a água, tornando a reação de hidratação mais rápida. Além disso, quanto maior o consumo de cimento do concreto, maior será o calor de hidratação gerado (RIDING *et al.* 2012).

Em geral, a utilização de materiais cimentícios suplementares reduz o calor gerado pela reação de hidratação do cimento Portland. No entanto, essa redução é menos visível para a utilização da sílica ativa, quando utilizada em pequenas quantidades, entre 4% e 12% (BOURCHY *et al.* 2019).

A relação água/cimento também é conhecida por afetar significativamente a quantidade total de calor, já que um fator a/c maior fornecerá mais água e espaço disponível para que a reação de hidratação ocorra (RIDING *et al.*, 2012).

2.1.2.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão do CAD é bem superior que a do concreto convencional. Quando são fixadas relações água/cimento baixas, selecionados agregados adequados e melhorada a zona de transição, invariavelmente a resistência à compressão é afetada positivamente (CHENG *et al.* 2012).

Para concretos convencionais, é válida a Lei de Abrams, que relaciona o acréscimo da resistência à compressão com o decréscimo da relação a/c, em proporção exponencial. Entretanto, essa lei é válida apenas até que a resistência de ruptura do agregado graúdo se torne o elo mais fraco do concreto de alto desempenho (AİTCIN; 2000; LESSARD, 2019).

Mesmo quando o agregado graúdo é suficientemente resistente, é extremamente difícil formular uma relação entre água/cimento e a resistência à compressão do concreto. Aİtcin (2000) apresentou alguns parâmetros práticos, relacionando a resistência à compressão do CAD com os fatores água/cimento. Os valores propostos pelo autor podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistência à compressão do concreto de alto desempenho em função da relação água/cimento.

Relação água/cimento	Faixa de resistência à compressão máxima (MPa)
0,40 - 0,35	50 – 75
0,35 - 0,30	75 – 100
0,30 - 0,25	100 - 125
0,25 - 0,20	≥ 125

Fonte: Adaptado de Aİtcin (2000).

Prever o comportamento do concreto de alto desempenho é relativamente difícil em comparação ao concreto convencional. Certas propriedades do material não são totalmente compreendidas, uma vez que a relação entre os componentes e suas propriedades é altamente não-linear. Assim, os modelos tradicionais são inadequados para analisar a resistência à compressão do CAD (CHOU; TSAI, 2012).

O Eurocode 2 (CEN, 2004) apresenta a Equação (1) para a resistência esperada de concretos em qualquer idade, através do coeficiente β_1 , que representa a relação entre a resistência após t dias e a resistência aos 28 dias ($f_{c,t}/f_c$). A mesma equação é apresentada também na NBR 6118 (ABNT, 2014a).

$$\beta_1 = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{1/2} \right] \right\} \quad (1)$$

Sendo:

$s = 0,38$ para concreto de cimento CP III e CP IV;

$s = 0,25$ para concreto de cimento CP I e CP II;

$s = 0,20$ para concreto de cimento CP V-ARI.

t = idade efetiva do concreto, expressa em dias.

Observa-se que a equação considera apenas a influência do cimento Portland na evolução da resistência à compressão. No entanto, para concretos de alto desempenho com adições minerais, as reações pozolânicas tendem a demorar mais a ocorrer, resultando em um aumento de resistência em idades avançadas, normalmente acima de 28 dias (BOURCHY *et al.*, 2019).

2.1.2.3 Resistência à tração indireta

A resistência à tração do concreto é bem inferior à resistência à compressão, em grande parte devido à facilidade com que as fissuras podem se propagar sob as cargas de tração (ZAIN *et al.* 2002).

O aumento da resistência à compressão reduz a ductilidade do concreto. Diante disso, os concretos de alto desempenho manifestam um comportamento ainda mais frágil do que o concreto convencional (SAWANT; GHUGAL; KHAN, 2015).

A resistência à tração do concreto pode ser obtida por métodos diretos ou métodos indiretos, com a determinação da compressão diametral de corpos de

prova cilíndricos (em inglês, *split test*). Segundo a ASTM C496M-04 (2004), a resistência à tração indireta é geralmente maior que o valor obtido por métodos diretos.

Diversos modelos de regressão foram desenvolvidos para relacionar a resistência à tração indireta com a resistência à compressão, conforme mostra a Tabela 3. f_c é a resistência à compressão os concretos e f_{ct} é a resistência à tração por compressão diametral, em MPa.

Tabela 3 - Modelos de regressão para determinação da resistência à tração por compressão diametral com base na resistência à compressão de concretos.

Referência	Modelo de regressão para resistência à tração indireta	Faixas de resistência (MPa)
ACI 363R-10 (2010)	$f_{ct} = 0,59 f_c^{0,5}$	$21 \leq f_c \leq 83$
ACI 318R-11 (2011)	$f_{ct} = 0,56 f_c^{0,5}$	-
CEB-FIP (1991)	$f_{ct} = 0,3 f_c^{2/3}$	$f_c < 83$
Artoglu (1999)	$f_{ct} = 0,321 f_c^{0,661}$	$15 \leq f_c \leq 120$
Moktarzadeh e French (2000)	$f_{ct} = 0,32 f_c^{0,63}$	$48 \leq f_c \leq 103$
Artoglu, Girgin e Artoglu (2006)	$f_{ct} = 0,387 f_c^{0,63}$	$4 \leq f_c \leq 120$
Jaber; Gorgis e Hassan (2018)	$f_{ct} = 0,65 f_c^{0,5}$	$f_c \leq 62$

Fonte: A autora (2019).

2.1.2.4 Condutividade térmica

Condutividade térmica é a capacidade de determinado material transferir calor de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura. Sua unidade padrão no sistema internacional é o W/m.K (CALLISTER, 2012).

Esta propriedade é descrita pela Equação (2):

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Sendo:

q = fluxo de calor;

k = condutividade térmica;

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura.

O concreto é um material sólido heterogêneo e permeável. Em condições normais de temperatura, a transferência de calor neste material geralmente ocorre por condução. Suas propriedades térmicas são significativamente influenciadas pela distribuição espacial e razão de volume de seus elementos, tais como agregado, pasta cimentícia e vazios (CHUNG *et al.*, 2016).

A massa específica e o índice de vazios do concreto têm uma influência significativa na condutividade térmica. Quanto maior o índice de vazios do material, menor será a sua condutividade térmica (ASADI *et al.*, 2018). Real *et al.* (2016), verificaram uma redução de 0,6% na condutividade térmica com um aumento de 1% na porosidade dos concretos (REAL *et al.*, 2016).

A NBR 15220 (ABNT, 2005) apresenta os valores da condutividade térmica do concreto de acordo com a massa específica do material, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Condutividade térmica de acordo com a NBR 15220/2005.

Massa específica (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)
2200-2400	1,75
1600-1800	1,05
1400-1600	0,85
1200-1400	0,70
1000-1200	0,46

Fonte: ABNT (2005).

De forma simplificada, a NBR 15200 (ABNT, 2012a) permite considerar a relação entre condutividade e temperatura constante. Neste caso, deve-se adotar o valor de 1,3 W/m.K.

2.1.2.5 Resistividade elétrica do concreto

A resistividade elétrica é a propriedade que define o quanto um material se opõe à passagem de corrente elétrica. Esta medida é o inverso da condutividade elétrica (LAYSSI *et al.*, 2015; AZARSA; GUPTA, 2017).

Diversos estudos confirmam que a medição da resistividade elétrica é um método simples, não destrutivo e rápido, que pode ser utilizado como um controle de qualidade do concreto em edificações (SEGUL; GJORV, 2008). Esta propriedade é

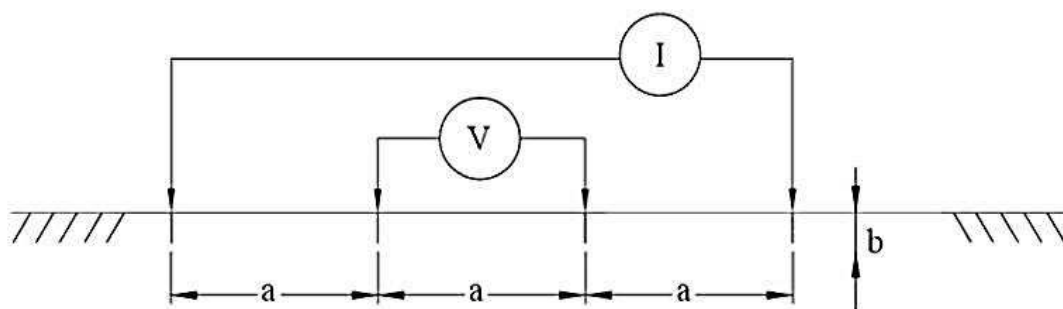
um bom parâmetro para ser usado na determinação da penetração de agentes agressivos no concreto, especialmente cloretos, sulfatos e dióxido de carbono (MEDEIROS-JUNIOR; LIMA, 2016).

A técnica baseada no método dos quatro eletrodos é a mais utilizada para medir a resistividade elétrica de maneira não destrutiva. Originalmente foi desenvolvida para medir a resistividade de solos, com as normas ASTM G57 e NBR 7117. Seu emprego em concreto só foi possível devido a adaptações propostas por Wenner, tornando o método conhecido por método de Wenner (BALESTRA *et al.* 2019).

O ensaio é realizado com uma fonte de alimentação de corrente alternada e frequência relativamente baixa. A corrente alternada é utilizada, pois uma corrente contínua poderia induzir efeitos de alta polarização na interface eletrodo-concreto, bem como no interior da amostra, nos poros da interface da fase sólida. Além disso, as técnicas baseadas em corrente contínua são insuficientes para eliminar as propriedades de capacitância do concreto nas medições (LAYSSI *et al.*, 2015). A utilização de uma frequência baixa é utilizada para minimizar os problemas de contato entre o eletrodo e o concreto.

Durante o ensaio, quatro eletrodos são colocados em contato com o concreto, equidistantes e alinhados, conforme mostra a Figura 1. Aplica-se uma pequena corrente alternada nos dois eletrodos extremos e mede-se a diferença de potencial (V) entre os dois eletrodos internos (SEGUL, 2014).

Figura 1 - Método de Wenner para medição da resistividade elétrica do concreto.



Fonte: Adaptado de Segul (2014).

De acordo com a NBR 7117 (ABNT, 2012b), o método dos quatro eletrodos determina a resistividade elétrica até uma profundidade aproximadamente igual à distância entre os eixos dos eletrodos.

A metodologia deste ensaio baseia-se no princípio de que o material analisado é homogêneo. No entanto, como o concreto é heterogêneo, sendo muito diferentes as resistividades da pasta e dos agregados, é necessário adequar à profundidade de penetração do eletrodo no concreto. Para que a influência da alta resistividade individual do agregado na determinação da resistividade elétrica não seja significativa, a distância entre os eixos dos eletrodos deve ser pelo menos 1,5 vezes maior do que o diâmetro máximo do agregado. Além disso, recomenda-se que o espaçamento entre os eixos dos eletrodos não exceda a $\frac{1}{4}$ da menor dimensão da seção transversal da peça. Deve-se garantir ainda que a distância entre a linha de eletrodos e a borda paralela seja no mínimo 2 vezes o espaçamento entre os eixos (HOPPE, 2005).

Alguns critérios de avaliação do potencial de corrosão pela resistividade elétrica, apresentados por diferentes autores, estão indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Avaliação do potencial de corrosão por meio da resistividade elétrica do concreto.

Referência	Resistividade elétrica do concreto (kΩ.cm)	Indicação de probabilidade de corrosão
CEB (1988)	< 5	Muito alta
	5 - 10	Alta
	10 - 20	Baixa
	> 20	Desprezível
RILEM (2000)	< 10	Alto
	10 - 50	Moderado
	50 - 100	Baixo
	> 100	Desprezível
Broomfield e Millard (2002)	< 5	Alto
	5 - 20	Moderado
	> 20	Baixo

Fonte: A autora (2019).

2.1.2.6 Durabilidade do concreto e ataque por sulfato

A durabilidade é definida como a capacidade do concreto de manter seu desempenho estrutural em longo prazo. Depende muito da sua capacidade de prevenir o ingresso de espécies químicas ou gasosas nocivas. Neste sentido, a permeabilidade e a porosidade são as propriedades mais importantes, pois governam a penetração de umidade e de substâncias químicas e gasosas no

concreto, afetando as propriedades de durabilidade como carbonatação, ataque de sulfato, ataque ácido, corrosão, reação álcali-agregado, entre outras (HUI-SHENG; BI-WAN; XIAO-CHEN, 2009).

O ataque externo por sulfato ocorre tipicamente durante a interação com soluções contendo sulfato, como a água do mar, a água subterrânea e o solo. Estruturas de concreto em ambientes marinhos são destruídas no início de suas aplicações práticas e não podem atingir sua vida útil pré-determinada uma vez que a água do mar contém alta concentração de sulfato e cloreto. Estruturas de concreto submetidas a ciclos de molhagem e secagem aceleram o ataque de sulfato no concreto causado por respingos e marés, intensificando ainda mais os danos associados a essa exposição (CHEN *et al.*, 2017).

A degradação do concreto em função do ataque por sulfatos se dá por meio de reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e íons sulfato (SO_4^{-2}), levando à formação de etringita e gipsita. Os produtos dessa reação são expansivos, podendo conduzir à fissuração e a degradação das camadas externas do concreto, levando à perda progressiva de resistência mecânica, rigidez e massa (STEINDL *et al.*, 2019).

A utilização de materiais pozolânicos, especialmente no CAD, contribui significativamente para melhorias no desempenho do concreto frente ao ataque de sulfato. Os compostos hidratados, necessários para que a reação com o sulfato ocorra, consistem basicamente em hidróxido de cálcio (C-H) e aluminato tricálcico (C_3A). Dessa forma, o uso de pozolana em concreto contribui de várias formas para o melhor desempenho do material frente ao ataque de sulfatos: (1) ao utilizar adições minerais pozolânicas, reduz-se a quantidade de C_3A disponível para a mistura; (2) como a reação pozolânica consome parte do C-H disponível na mistura, a quantidade deste fica bastante reduzida na pasta de cimento hidratada; (3) as adições minerais contribuem para a redução da permeabilidade do concreto, dificultando o ingresso de sulfatos (MERIDA; KHARCHI, 2015).

2.2 CONCRETOS COM FIBRAS DE POLIPROPILENO

O concreto é um material que apresenta um comportamento marcadamente frágil e uma baixa capacidade de deformação antes da ruptura quando submetido a esforços de tração. Uma vez fissurado, perde completamente a capacidade de

resistir aos esforços de tração. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a resistência à tração do concreto é bem inferior à resistência à compressão, geralmente em torno de 7% a 11%.

Uma das técnicas mais utilizadas que permite minimizar essas limitações é a utilização de fibras para reforço do concreto (PLIZZARI; MINDESS, 2019).

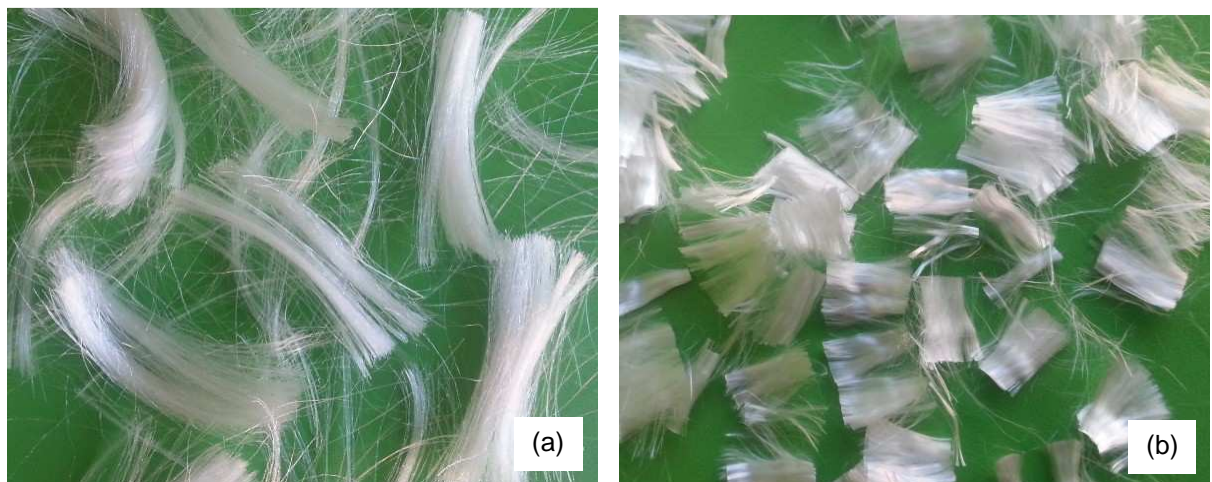
Esta seção apresenta as principais propriedades dos concretos reforçados com fibras de polipropileno, bem como algumas informações a respeito desta fibra.

2.2.1 Fibras de polipropileno

As fibras de polipropileno são fabricadas a partir de resinas de polipropileno com moléculas de elevado peso molecular. Por causa do arranjo atômico regular de suas macromoléculas, normalmente as fibras são produzidas em forma cristalina e depois processadas para alcançar um alto grau de orientação, necessário para obter boas propriedades (BENTUR; MINDESS, 2007).

Podem ser divididas em dois grupos básicos: as microfibras e as macrofibras. As microfibras são fornecidas fibriladas ou em monofilamentos. As fibriladas (Figura 2a) são uma malha de finos filamentos de seções retangulares que promovem um aumento da adesão entre a fibra e a matriz. Já as de monofilamento (Figura 2b) são fios cortados em comprimento padrão. Apresentam diferentes diâmetros, variando de cerca de 50 μm a 0,5 mm (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 2 - Microfibras de polipropileno: (a) fibriladas; (b) monofilamento.



Fonte: Figueiredo (2011).

As macrofibras de polipropileno (Figura 3) foram desenvolvidas para se obter um reforço estrutural nos mesmos moldes que as fibras de aço (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 3 - Macrofibras de polipropileno disponíveis no mercado brasileiro.



Fonte: Figueiredo (2011).

As fibras de polipropileno apresentam baixo módulo de elasticidade, na faixa entre 3 e 5 GPa e resistência à tração entre 140 e 690 MPa (BENTUR; MINDESS, 2007).

Dentre suas vantagens, destaca-se a alta resistência a álcalis, ponto de fusão relativamente elevado (aproximadamente 165°C), baixa massa específica e baixo preço do material. O emprego das fibras de polipropileno, especialmente as microfibras, não contribui significativamente na resistência à tração do concreto. Por outro lado, sua incorporação colabora na ampliação da capacidade de deformação, rigidez, resistência ao impacto e no controle do processo de fissuração. Além disso, contribuem significativamente para evitar a ocorrência de fissuras decorrentes de retração plástica, nas primeiras horas após o lançamento do concreto (MAGALHÃES; REAL, 2011; PLIZZARI; MINDESS, 2019).

Suas maiores limitações são a baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar e a presença de oxigênio, módulo de elasticidade baixo e fraca capacidade de aderência à matriz cimentícia (BENTUR, MINDESS, 2007). Entretanto, essas desvantagens não são necessariamente críticas. Sua baixa resistência ao fogo, por exemplo, permite atenuar os efeitos de altas temperaturas no concreto, especialmente o concreto de alto desempenho. Como a fibra vaporiza em temperaturas próximas a 350°C, reduzindo consideravelmente seu volume, são criados canais interligados no concreto, que permitem a dissipação da poro-pressão e contribuem para a redução das tensões internas (PLIYA; BEAUCOUR; NOUMOWÉ, 2011; XIONG; LIEW, 2015; LIU; TAN; YAO, 2018).

As vantagens da utilização de fibras de polipropileno em argamassas e concretos vêm sendo comprovada por inúmeros pesquisadores e o baixo custo do material tem despertado o interesse em diversas aplicações.

2.2.2 Propriedades do concreto de alto desempenho com fibras de polipropileno

As principais propriedades dos concretos reforçados com fibras, especificamente as de polipropileno, são apresentadas a seguir: trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração e condutividade térmica.

2.2.2.1 Trabalhabilidade

Genericamente, a trabalhabilidade do concreto pode ser prejudicada com a adição de fibras, especialmente quando são utilizados teores muito elevados, dificultando a aplicação da mistura em estruturas de concreto armado.

Arunachalam e Jayakumar (2015) utilizaram o ensaio de abatimento de tronco de cone para verificar a trabalhabilidade de misturas de concreto de alto desempenho com teores de fibras de polipropileno variando entre 0,1% e 0,6%. Os resultados indicaram uma redução da trabalhabilidade com o aumento do teor de fibras, sendo que o teor de fibras de 0,6% apresentou a pior trabalhabilidade dentre todas as misturas avaliadas.

Alsadey e Salem (2016) identificaram que teores de 1% e 1,5% praticamente não alteraram a trabalhabilidade dos concretos. Porém, ao aumentar a quantidade de fibras para 2%, a trabalhabilidade do concreto foi severamente prejudicada.

Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) analisaram misturas com 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³. Observou-se que o aumento no teor das fibras provocou uma redução na trabalhabilidade das amostras. Entretanto, para o teor de fibras igual a 1 kg/m³ a redução não foi significativa, diminuindo a trabalhabilidade em apenas 5%.

2.2.2.2 Resistência à compressão

De maneira geral, quando se utilizam teores muito elevados de fibras, pode haver um decréscimo na resistência à compressão devido ao aumento na porosidade e no teor de ar incorporado. Além disso, o elo entre as fibras e os

agregados do concreto é muito fraco, contribuindo ainda mais para essa redução (ABAEIAN; BEHBAHANI; MOSLEM, 2018).

Apesar disso, quando são utilizadas quantidades adequadas de fibras, associado com a correta utilização de misturadores e vibradores, é possível obter concretos com elevada resistência à compressão.

Os estudos presentes na literatura sobre a influência da fibra de polipropileno na resistência à compressão de concretos de alto desempenho, apresentados a seguir, são bastante variados. Porém, na sua maioria, os resultados indicaram que as fibras não influenciaram significativamente nesta propriedade mecânica.

Para teores entre 0,15-0,45% e 1-2%, Afroughsabet e Ozbakkaloglu (2015) e Wang *et al.* (2019) obtiveram pequenos acréscimos na resistência à compressão de concretos de alto desempenho, porém, as diferenças não foram expressivas.

Cao *et al.* (2017) utilizaram um teor de 1 kg/m³ de fibras de polipropileno, o que não influenciou na resistência à compressão dos concretos.

Para Eidan *et al.* (2019), a adição de fibras de polipropileno em dosagens entre 1 e 2 kg/m³ praticamente não alterou a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto.

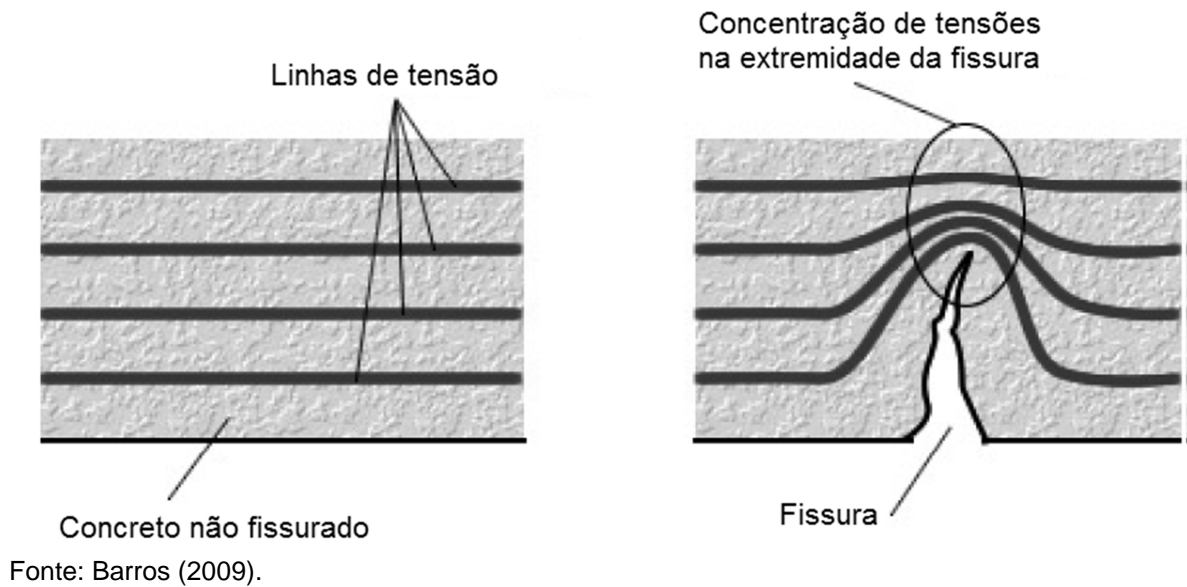
No estudo de Abaeian, Behbahani e Moslem (2018), a adição de 1 kg/m³ de fibras de polipropileno também não influenciou a resistência à compressão. Entretanto, ao elevar a quantidade de fibras para 2 kg/m³ e 3 kg/m³, houve uma diminuição de 4,3% e 12,7%, respectivamente.

2.2.2.3 Resistência à tração

A utilização de fibras no concreto não está associada com o aumento da resistência à compressão. Sua principal função é formar uma ponte para a transferência de tensões através das fissuras, quando o concreto é submetido a esforços de tração (PLIZZARI; MINDESS, 2019).

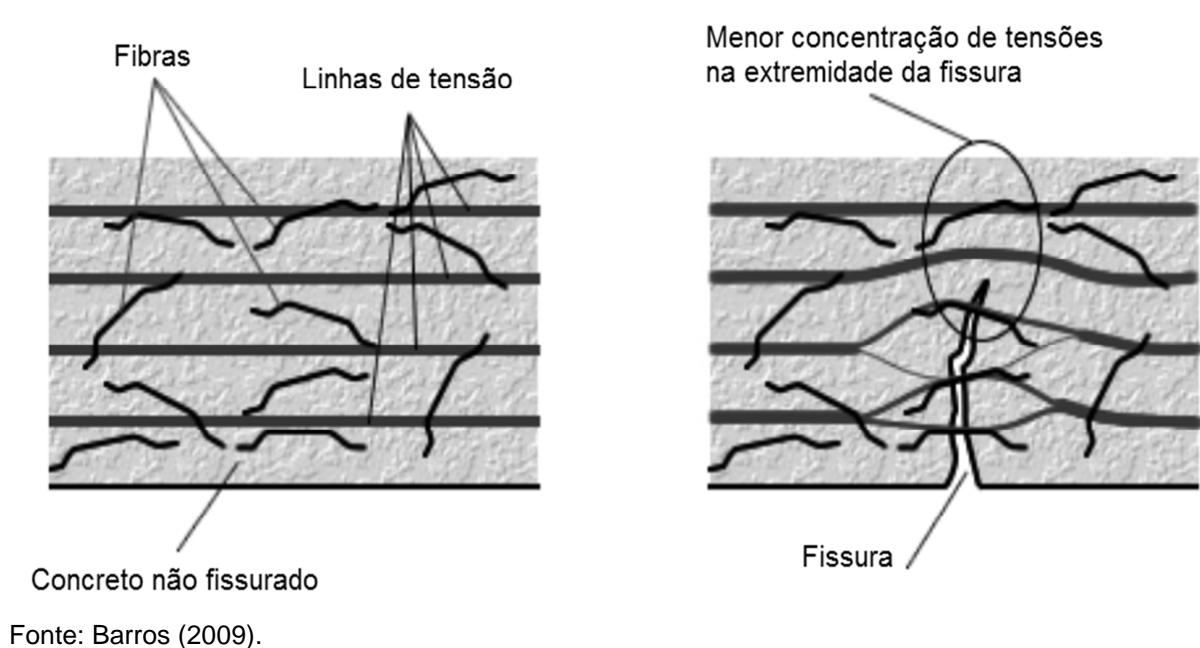
Em um concreto sem fibras, a abertura de uma fissura representa uma barreira à propagação de tensões. Isso provoca uma concentração de tensões nas bordas da fissura, possibilitando a ruptura frágil do material caso essa tensão supere a resistência da matriz (Figura 4).

Figura 4 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem reforço de fibras.



Quando são adicionadas fibras em dosagens adequadas, e se elas forem suficientemente resistentes e rígidas, o compósito deixa de ter caráter marcadamente frágil, passando a ter um comportamento pseudo-dúctil ou não frágil. A fibra passa a servir como ponte para a transferência de tensões, diminuindo a concentração nas bordas das fissuras. A velocidade de propagação reduz consideravelmente, melhorando a capacidade resistente de fissuração do concreto (Figura 5).

Figura 5 - Esquema de concentração de tensões para um concreto com reforço de fibras.



No caso das microfibras de polipropileno, o aumento na resistência à tração não é tão expressivo quanto os resultados com fibras de aço ou macrofibras sintéticas.

Afroughsabet e Ozbakkaloglu (2015) analisaram a resistência à tração de misturas de concreto de alto desempenho com teores entre 0,15-0,45%, em volume. Observou-se um aumento de 13%, 16% e 20% na resistência à tração aos 28 dias ao adicionar 0,15%, 0,30% e 0,45% de fibras de polipropileno, respectivamente.

Mohammadhosseini, Awal e Yatim (2017) fizeram um estudo semelhante, com teores de fibras de polipropileno variando de 0% a 1,25%, em volume. Neste caso, a resistência à tração aumentou com a adição de fibras, porém, as diferenças entre os teores de fibras não foram tão significativas.

Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) verificaram que a adição de 1 kg/m³ de fibras de polipropileno praticamente não influenciou na resistência à tração direta do concreto. Entretanto, ao elevar o volume de fibras no concreto, a resistência à tração aumentou significativamente, chegando a um aumento de 4,2% com 3 kg/m³ de fibras.

2.2.2.4 Condutividade térmica

Em geral, dois fatores importantes afetam a condutividade térmica de um material: a massa específica e a presença de impurezas. A adição de fibras poliméricas em percentuais volumétricos próximos a 1% pouco altera a massa específica do material. Sendo assim, desse ponto de vista, as fibras não modificariam a condutividade térmica do concreto. Entretanto, do ponto de vista térmico, as fibras agem como impurezas dentro do concreto. Essas impurezas criam descontinuidades que dificultam a transmissão de energia térmica no interior do material. Caso esse efeito seja significativo, pode ser observada uma redução considerável no coeficiente de condutividade de concretos reforçados com fibras (LIU; CHEN, 2014).

Os estudos de Gül *et al.* (2007), indicaram uma pequena redução (entre 1% e 13%) na condutividade térmica ao adicionar quantidades de polipropileno variando entre 0,25% e 1,75%, em volume. Com 1 kg/m³ (0,1%, em massa), Khaliq e Kodur (2011) não verificaram alterações significativas.

2.3 EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

Quando expostos a altas temperaturas, os materiais à base de cimento sofrem alterações físico-químicas que prejudicam suas propriedades mecânicas e comprometem sua durabilidade (CASTRO; TIBA; PANDOLFELLI, 2011).

2.3.1 Mecanismos físicos de degradação

A elevação da temperatura no concreto aumenta a porosidade e o tamanho dos poros do material, como resultado da evaporação de água e das mudanças químicas ocorridas nos produtos de hidratação do cimento. O surgimento de microfissuras decorrentes da desidratação do hidróxido de cálcio também contribui para o aumento da porosidade total. Esse efeito é um dos responsáveis pela redução das propriedades mecânicas no concreto em elevadas temperaturas (HOSSAIN, 2006; LAU; ANSON, 2006; HAGER, 2013; HEIKAL *et al.*, 2013).

Adicionalmente, dilatações e retrações térmicas provocam uma grande mudança de volume no material, o que resulta em altas tensões e deformações internas, levando à microfissuração e, conseqüentemente, à redução da resistência mecânica (MA *et al.*, 2015).

As diferentes tensões térmicas existentes na matriz cimentícia e nos agregados levam ao surgimento e propagação de microfissuras em elevadas temperaturas. O aquecimento do concreto faz com que os agregados aumentem de volume, ao mesmo tempo em que causa a retração da pasta cimentícia que os envolvem. Como resultado, a zona de transição (interface) é a região mais danificada. Até 200°C, não é comum o surgimento de microfissuras. No entanto, quando a temperatura sobe, acima de 400°C, as microfissuras se propagam e aumentam de tamanho (MA *et al.*, 2015; MOLAY *et al.*, 2019).

2.3.2 Mecanismos químicos de degradação

Quando submetido ao aquecimento, o concreto apresenta não somente mudanças físicas, mas também passa por diversas alterações químicas. Essas mudanças são complexas devido a não uniformidade do material, de forma que a

pasta cimentícia reage de maneira diferente que os agregados (FLETCHER *et al.*, 2006).

O aquecimento do concreto resulta na desidratação gradual da pasta cimentícia. A água livre e a água capilar evaporam primeiro, na faixa entre 100-140°C. Se a temperatura atingir 400°C, o hidróxido de cálcio começa a desidratar, gerando mais vapor d'água. A decomposição do silicato de cálcio hidratado inicia em aproximadamente 560°C. Com os agregados, outras mudanças químicas podem ocorrer em temperaturas mais altas. Agregados à base de quartzo aumentam de volume devido a uma transformação mineral em 580°C. Agregados de calcário se decompõem completamente em 800°C (PENG; HUANG, 2008, IBRAHIM; HAMID; TAHA, 2012; HAGER, 2013).

As mudanças químicas decorrentes do aquecimento gradual do concreto provocam também alterações na coloração da pasta cimentícia e dos agregados. Quando aquecido entre 300°C e 600°C, os agregados silicosos (quartzo e brita) adquirem uma coloração avermelhada devido à oxidação do ferro. Em temperaturas elevadas, a cor da pasta cimentícia muda para uma tonalidade cinza esbranquiçado (HAGER, 2014).

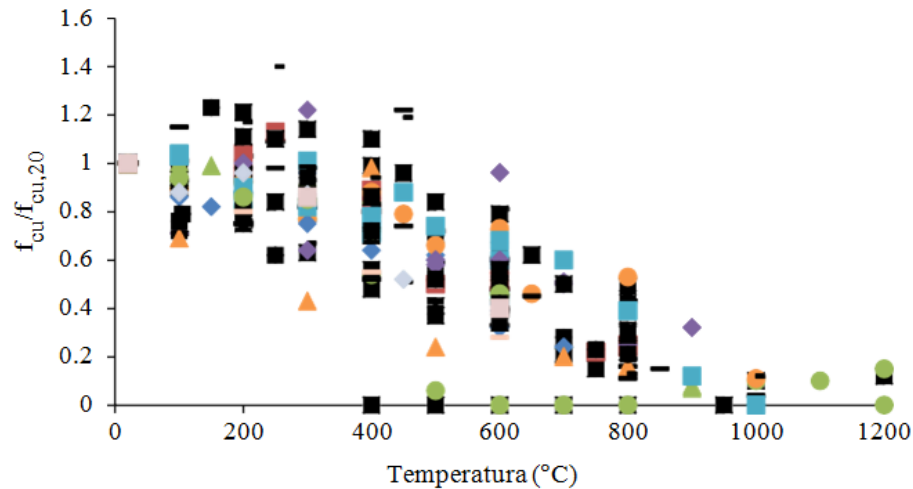
2.3.3 Propriedades mecânicas de concretos submetidos a elevadas temperaturas

2.3.3.1 Resistência à compressão

A redução da resistência à compressão dos concretos em elevadas temperaturas é influenciada por diversos fatores como a resistência inicial, a taxa de aquecimento, os componentes da mistura, as condições de carregamento, entre outros (KRISHNA; PRIYADARSINI; NARAYANAN, 2019).

A Figura 6 apresenta os resultados de 46 estudos, que relacionam a redução da resistência à compressão de concretos em diferentes temperaturas. Os concretos apresentavam resistências de até 120 MPa. Foram analisados corpos de prova em formato cúbico, considerando apenas a temperatura, sem carregamento aplicado. Cada símbolo no gráfico representa os resultados de um estudo, dentro os 46 estudos analisados.

Figura 6 - Dados referentes à resistência à compressão residual de concretos em elevadas temperaturas.



Fonte: Ma *et al.* (2015).

A redução da resistência à compressão foi classificada por Ma *et al.* (2015) em três estágios principais:

- (1) Temperatura ambiente - 300°C: ocorre um decréscimo sutil na resistência à compressão, mantendo-se praticamente constante.
- (2) 300°C - 800°C: a resistência decresce drasticamente.
- (3) Acima de 800°C: o concreto perde toda a sua resistência mecânica inicial.

Analisando de um ponto de vista microestrutural, a redução da resistência à compressão em temperaturas abaixo de 600°C é causada principalmente pelo surgimento de fissuras e alteração na porosidade do material. A decomposição de parte do hidróxido de cálcio hidratado e do silicato de cálcio, que ocorre entre 430 e 600°C, tem um efeito adicional na perda de resistência (PENG; HUANG, 2008).

No Brasil, a NBR 15200 (ABNT, 2012a) aborda critérios para projetos de concreto armado em situações de incêndio. São apresentados apenas os coeficientes de redução da resistência à compressão de concretos convencionais, produzidos exclusivamente com agregados silicosos. Vale ressaltar, que a norma brasileira não estabelece critérios limites de resistência à compressão para utilização destes valores de referência. A norma restringe apenas o limite da massa específica: 2000 kg/m³ a 2800 kg/m³.

Os mesmos coeficientes apresentados pela norma brasileira também são indicados no Eurocode 2. Porém, a norma europeia acrescenta os valores para agregados calcáreos. Além disso, são apresentados também os coeficientes de

redução da resistência à compressão para concretos de alta resistência, subdivididos em três categorias: a classe 1, com resistências de 55 a 60 MPa; a classe 2, de 70 a 80 MPa e a classe 3, de 80 a 90 MPa (CEN, 2004).

A Tabela 6 também apresenta alguns importantes modelos de regressão encontrados na literatura, que relacionam a resistência à compressão de concretos em diferentes faixas de temperatura.

Tabela 6 - Modelos de regressão para a resistência à compressão em diferentes faixas de temperatura.

Referência	Modelos para resistência à compressão	Faixas de temperatura
American Society of Civil Engineers - ASCE (2015)	$f_{cT} = f_c$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 450^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = f_c \left[2,011 - 2,353 \left(\frac{T - 20}{1000} \right) \right]$	$450^{\circ}\text{C} \leq T \leq 874^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = 0$	$T \geq 874^{\circ}\text{C}$
Kodur <i>et al.</i> (2004)	$f_{cT} = f_c [(1 - 0,003125 (T - 20))]$	$T \leq 100^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = 0,75 f_c$	$100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = f_c (1,33 - 0,00145 T)$	$T \geq 400^{\circ}\text{C}$
Chang <i>et al.</i> (2006)	$f_{cT} = f_c (1,01 - 0,00055 T)$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = f_c (1,15 - 0,00125 T)$	$200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$
Krishna; Priyadarsini; Naraynan (2019)	$f_{cT} = f_c (1,0032 - 0,00044T)$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = f_c (1,4163 - 0,0016T)$	$400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$
	$f_{cT} = 0$	$T \geq 800^{\circ}\text{C}$

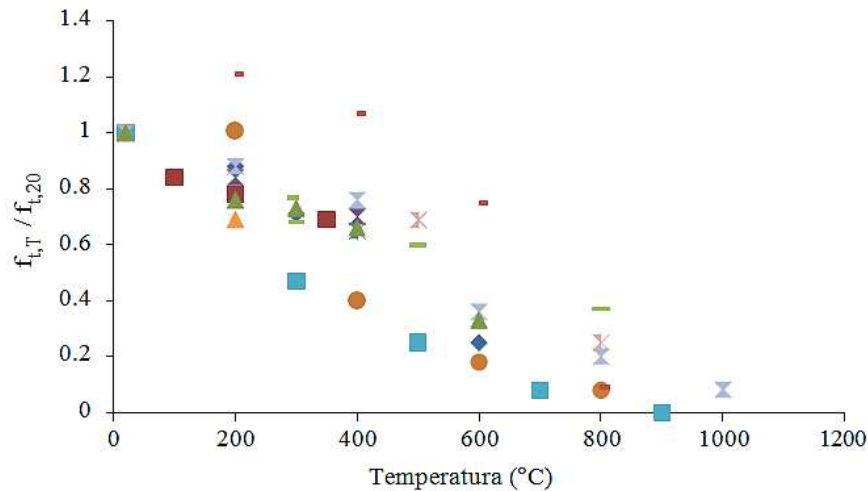
Fonte: A autora (2019).

2.3.3.2 Resistência à tração indireta

A resistência à tração é uma propriedade mecânica extremamente importante quando o concreto é submetido a solicitações térmicas. A resistência à tração residual permite estimar a degradação da interface pasta-agregado. A fissuração do concreto normalmente ocorre devido a tensões de tração e os danos estruturais frequentemente estão associados à propagação de microfissuras (KHALIQ, KODUR, 2012; MOLAY *et al.*, 2019).

Na Figura 7 estão indicados os resultados de 11 estudos que relacionavam a redução da resistência à tração de concretos em diferentes temperaturas.

Figura 7 - Dados referentes à resistência à tração indireta residual de concretos em elevadas temperaturas.



Fonte: Ma *et al.* (2015).

Observa-se que o comportamento é semelhante à resistência à compressão. A resistência à tração também reduz com o aumento da temperatura, porém, a uma taxa de decréscimo linear.

Behnood e Ghandehari (2009) observaram que a resistência à tração indireta residual de concretos contendo 10% de adição mineral (cinza volante) e relação água/materiais cimentícios igual a 0,3, reduziu 5%, 60%, 80% e 90%, quando os concretos foram submetidos a 200, 400, 600 e 800°C, respectivamente.

A Tabela 7 apresenta alguns modelos de regressão para a resistência à tração em diferentes faixas de temperatura.

Tabela 7 - Modelos de regressão para a resistência à tração em diferentes faixas de temperatura.

Referência	Modelos para resistência à tração	Faixas de temperatura
Eurocode 2 (CEN, 2004)	$f_{ct\,T} = f_{ct}$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C}$
	$f_{ct\,T} = f_{ct} \left[1 - \left(\frac{T - 100}{500} \right) \right]$	$100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 600^{\circ}\text{C}$
	$f_{ct\,T} = 0$	$T \geq 600^{\circ}\text{C}$
Chang <i>et al.</i> (2006)	$f_{ct\,T} = f_{ct} (1,05 - 0,0025\,T)$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C}$
	$f_{ct\,T} = 0,80\,f_{ct}$	$100^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C}$
	$f_{ct\,T} = f_{ct} (1,02 - 0,0011\,T)$	$200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$
	$f_{ct\,T} = 0$	$T \geq 800^{\circ}\text{C}$
Krishna;	$f_{ct\,T} = f_{ct} (0,9678 - 0,0009\,T)$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400^{\circ}\text{C}$
Priyadarsini;	$f_{ct\,T} = f_{ct} (1,1205 - 0,0014\,T)$	$400^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$
Naraynan (2019)	$f_{ct\,T} = 0$	$T \geq 800^{\circ}\text{C}$

Fonte: A autora (2019).

2.3.3.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade do concreto é uma medida de sua rigidez ou resistência à deformação. Como a curva tensão-deformação é não-linear, seu valor pode ser determinado pelos módulos inicial, secante ou tangente.

Algumas equações para determinação do módulo de elasticidade do concreto em temperatura ambiente estão indicadas na Tabela 8, onde f_c é a resistência à compressão, em MPa e E_c é o módulo de elasticidade, em MPa.

Tabela 8 - Modelos de regressão para o módulo de elasticidade em temperatura ambiente.

Referência	Equações para módulo de elasticidade	Condições para utilização
Eurocode 2 (CEN, 2004)	$E_c = 22000 \left[\left(\frac{f_c}{10} \right) \right]^{0,3}$	-
ACI 363.R-10 (2010)	$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900$	$21 \text{ MPa} \leq f_c \leq 81 \text{ MPa}$
ACI 318.R-11 (2011)	$E_c = 2090 \sqrt{f_c} + 22680$	$45 \text{ MPa} \leq f_c \leq 90 \text{ MPa}$
$E_c = 5600 \alpha_E \sqrt{f_c}$		
NBR 6118 (ABNT, 2014a)	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss; $\alpha_E = 0,9$ para calcário; $\alpha_E = 0,7$ para arenito.	$20 \text{ MPa} \leq f_c \leq 50 \text{ MPa}$
$E_c = 21500 \alpha_E \left(\frac{f_c}{10} + 1,25 \right)^{1/3}$		
NBR 6118 (ABNT, 2014a)	$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio; $\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss; $\alpha_E = 0,9$ para calcário; $\alpha_E = 0,7$ para arenito.	$55 \text{ MPa} \leq f_c \leq 90 \text{ MPa}$

Fonte: A autora (2019).

O aumento da temperatura rapidamente diminui o módulo de elasticidade do concreto. Sua degradação pode ser atribuída ao excesso de tensões térmicas e as alterações físicas e químicas que ocorrem na microestrutura do material (KRISHNA; PRIYADARSINI; NARAYANAN, 2019).

A Tabela 9 apresenta alguns modelos de regressão para o decréscimo do módulo de elasticidade do concreto em diferentes temperaturas.

Tabela 9 - Modelos de regressão para o módulo de elasticidade em diferentes temperaturas.

Referência	Modelos para módulo de elasticidade	Faixas de temperatura
Xiao e Konig (2004)	$E_{cT} = (1 - 0,00015 T) E_c$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 300^{\circ}\text{C}$
	$E_{cT} = (0,87 - 0,00084 T) E_c$	$300^{\circ}\text{C} \leq T \leq 700^{\circ}\text{C}$
	$E_{cT} = 0,28 E_c$	$T \geq 700^{\circ}\text{C}$
Krishna; Priyadarsini; Narayanan (2019)	$E_{cT} = (1,0265 - 0,001282 T) E_c$	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800^{\circ}\text{C}$

Fonte: A autora (2019).

2.3.4 Concreto de alto desempenho em elevadas temperaturas

O aumento da resistência no concreto de alto desempenho geralmente é alcançado pela incorporação de adições minerais que reagem com o hidróxido de cálcio (CaOH_2) e são convertidas para silicato de cálcio hidratado (C-S-H), enquanto há uma hidratação contínua. Neste processo, a porosidade da matriz é reduzida, gerando uma microestrutura densa e impermeável, que aumenta a resistência do concreto. Apesar disso, em elevadas temperaturas, a baixa permeabilidade torna-se prejudicial para o desempenho em condições de incêndio (KODUR, 2018; EIDAN *et al.*, 2019).

No caso do concreto convencional, a resistência à compressão é bastante afetada em temperaturas acima de 400°C . Isso ocorre porque este tipo de concreto geralmente é bastante permeável, o que permite a dissipação da poro-pressão resultante da evaporação do vapor d'água. Por outro lado, a microestrutura compacta do CAD não permite que a umidade escape, resultando no acúmulo de pressão nos poros e no rápido desenvolvimento de microfissuras, levando a uma deterioração mais rápida da resistência mecânica e ocorrência de efeito *spalling* (BANGI; Horiguchi, 2011; KODUR, 2014; CAETANO *et al.*, 2019).

Concretos com resistências elevadas começam a diminuir sua resistência à compressão em temperaturas mais baixas se comparadas com o concreto convencional. O concreto de alto desempenho inicia a perda de resistência em aproximadamente 150°C (correspondendo a uma significativa redução de 30% da resistência inicial), enquanto que nos concretos convencionais, essa redução tem início em temperaturas próximas a 350°C (CAETANO *et al.*, 2019).

Xiong e Liew (2015) avaliaram o efeito de elevadas temperaturas (até 800°C) em um concreto convencional (50 MPa) e concretos de alto desempenho (160 MPa).

Na temperatura de 200°C, houve um aumento na resistência à compressão dos concretos de alto desempenho, o que não ocorreu com o concreto convencional. Isso foi relacionado ao fato de que nesta faixa de temperatura (200°C), ocorrem dois fenômenos no concreto: (1) a remoção de água faz com que sua microestrutura se torne mais porosa; (2) a retração do concreto provoca um aumento nas forças entre partículas de gel (as forças de Van der Waals). Quando as forças de Van der Waals superam o aumento na porosidade do material, ocorre um aumento na resistência à compressão do material, como foi o caso dos concretos de alto desempenho. Já no concreto convencional, como a quantidade de água era bem superior ao CAD, o aumento da porosidade foi conseqüentemente superior, fazendo com que a resistência à compressão não aumentasse nesta temperatura.

Para temperaturas superiores, até 800°C, todos os concretos sofreram reduções significativas na resistência à compressão, atribuída à decomposição dos produtos de hidratação, como o C-S-H e o hidróxido de cálcio, deterioração dos agregados e fissuras geradas devido à incompatibilidade térmica entre o agregado e a pasta de cimento, levando à concentração de tensões.

Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) verificaram o comportamento do concreto convencional e do concreto de alto desempenho, submetidos a temperaturas entre 100-300°C. O estudo comprovou que o concreto de alto desempenho é mais vulnerável do que o concreto convencional, mesmo em temperaturas mais baixas. Para o CC, a redução da resistência à compressão foi de 4%, 8% e 14%, nas temperaturas de 100°C, 200°C e 300°C, respectivamente. Já no CAD, a redução foi mais marcante: 7,2%, 14,5% e 27,5%, respectivamente.

2.3.5 Efeito *spalling*

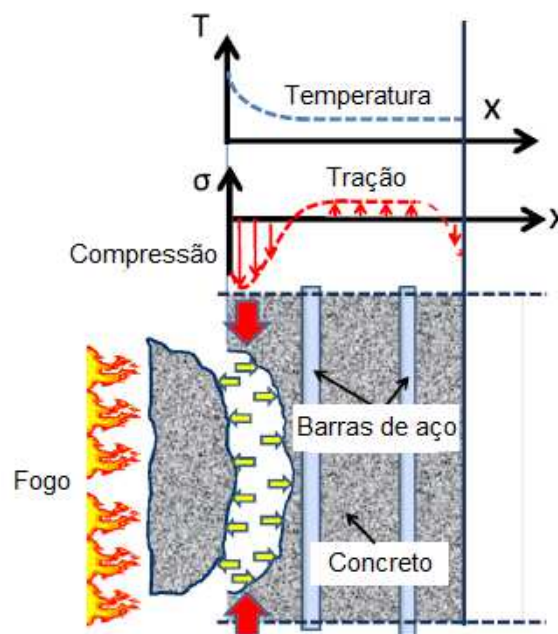
O efeito *spalling*, ou lascamento explosivo, é um fenômeno que ocorre no concreto submetido a elevadas temperaturas. Caracteriza-se pelo deslocamento violento de porções de material da superfície aquecida. A fragmentação resulta em perda de massa, redução da seção de concreto e diminuição da resistência mecânica do elemento estrutural (FU; LI, 2011; LIU; TAN; YAO, 2018).

Normalmente, este fenômeno é resultante da combinação de dois mecanismos: (1) acúmulo de pressão nos poros e (2) surgimento de tensões térmicas.

A pressão acumulada nos poros aumenta gradualmente com a elevação da temperatura, como resultado da transferência de calor e migração do vapor d'água no interior do concreto. Quando o esforço de tração induzido pela poro-pressão é maior do que a resistência à tração do concreto, ocorre o deslocamento de material da superfície. Esse é o principal motivo para a ocorrência do efeito *spalling* em concretos submetidos a elevadas temperaturas (KANÉMA *et al.*, 2011; DWAIKAT; KODUR, 2009).

Já o processo termo-mecânico está relacionado diretamente com os gradientes de temperatura que ocorrem entre a superfície e o interior do material. Isso induz o surgimento de tensões de compressão próximas à superfície aquecida e a tensões de tração nas regiões internas da estrutura (Figura 8). As fissuras se desenvolvem paralelas à superfície quando a soma das tensões excede a resistência à tração do material. Isso é acompanhado pela liberação repentina de energia e uma violenta ruptura da região aquecida (OZAWA; MORIMOTO, 2014; LIU; TAN; YAO, 2018).

Figura 8 - Efeito *spalling* no concreto.



Fonte: Adaptado de Ozawa e Morimoto (2014).

A possibilidade de ocorrência do lascamento é maior com a redução da relação água/cimento ou com a densificação adicional da matriz pela incorporação de adições minerais. No concreto convencional, não ocorre o lascamento de

concreto, mesmo para teores elevados de umidade. No entanto, para o concreto de alto desempenho, quanto maior o teor de umidade, maior a probabilidade de fragmentação. O CAD pode apresentar *spalling* mesmo em temperaturas de aquecimento mais baixas. A matriz densa destes concretos (com permeabilidade extremamente baixa) impede a saída do vapor d'água gerado com altas temperaturas. Com isso, pressões de vapor são geradas dentro dos poros da matriz, promovendo o lascamento do material (CASTRO; TIBA; PANDOLFELLI, 2011; FU; LI, 2011; LIU; TAN; YAO, 2018).

Uma pesquisa realizada por Nazri *et al.* (2016) avaliou a resistência ao fogo de concretos de ultra alto desempenho com duas misturas que apresentavam fator água/cimento igual a 0,15 e 0,17 e consumo de cimento de 768 kg/m³ e 875 kg/m³, atingindo inicialmente 127 MPa e 161 MPa aos 28 dias. Aos 200°C, os concretos não tiveram seu desempenho comprometido, não apresentando lascamentos visíveis. Porém, aos 400°C e aos 600°C, as amostras sofreram graves lascamentos explosivos.

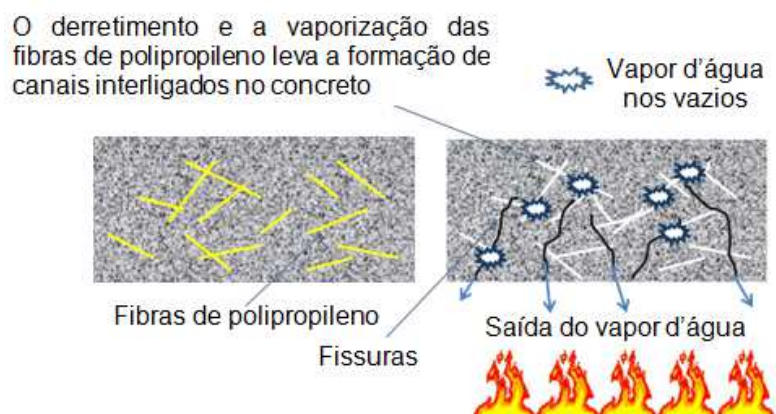
2.3.6 Fibras de polipropileno em altas temperaturas

O comportamento do concreto em elevadas temperaturas pode ser melhorado pela adição de fibras de baixo ponto de fusão, como as fibras de polipropileno.

Para temperaturas entre 160-170°C, as fibras de polipropileno começam a derreter, reduzindo significativamente o volume inicial ocupado. À medida que a temperatura vai aumentando, os filamentos vão se degradando e vaporizam completamente aos 350-360°C. O produto remanescente ocupa cerca de 5% do volume inicial (PLIYA; BEAUCOUR; NOUMOWÉ, 2011; XIONG; LIEW, 2015; LIU; TAN; YAO, 2018).

Os vazios deixados na matriz cimentícia pelo derretimento das fibras tornam o comportamento do CAD mais semelhante ao do concreto convencional, permitindo que o vapor d'água escape. Além de criar novos poros, o derretimento do polipropileno cria microfissuras na ponta das fibras, que conectam os poros já existentes no concreto. Isso previne a formação das zonas de alta pressão e consequentemente reduz significativamente o efeito *spalling*, conforme ilustra a Figura 9 (BEHNOOD; GHANDEHARI, 2009; OZAWA; MORIMOTO, 2014; YERMAK *et al.*, 2017).

Figura 9 - Atuação das fibras de polipropileno no efeito *spalling*.



Fonte: Adaptado de Ozawa e Morimoto (2014).

A eficiência das fibras depende de inúmeros fatores como o fator de forma das fibras, a orientação, o diâmetro, o comprimento, o teor de fibras adicionado, entre outros (SERRANO *et al.*, 2016).

As fibras de polipropileno mais eficientes são compostas de monofilamentos anisotrópicos com diâmetro entre 10 e 100 μm e comprimento entre 3 e 20 mm. As dosagens usuais são entre 1 kg/m^3 e 3,5 kg/m^3 . Abaixo de 1 kg/m^3 a eficácia das fibras é reduzida (LURA; TERRASI, 2014; MAZZUCCO; MAJORANA; SALOMONI, 2015; SERRANO *et al.*, 2016 ; KHALIQ; KODUR, 2018).

O Eurocode 2 (CEN, 2004) indica a dosagem de 2 kg/m^3 de fibras de polipropileno para minimizar os efeitos deletérios de altas temperaturas no concretos.

Fibras mais finas, com diâmetro de 12,5 μm , mostraram-se mais eficientes do que fibras de 20 μm (BILODEAU; KODUR; HOFF, 2004). Com relação ao comprimento, as fibras mais compridas apresentam um efeito melhor na prevenção da fissuração do concreto submetido a elevadas temperaturas. Isso ocorre porque após o aquecimento, as fibras mais compridas deixam canais mais extensos ao longo da matriz cimentícia, fazendo com que seja mais provável que esses canais se conectem e facilitem a dissipação da poro-pressão gerada no material, atuando significativamente na prevenção do efeito *spalling* (EIDAN *et al.*, 2019).

Ozawa e Morimoto (2014) realizaram testes de permeabilidade de concretos de alta resistência (72 MPa) com 1,37 kg/m^3 (0,15% em volume) de microfibras de polipropileno. Os resultados indicaram que a permeabilidade aumentou 12 vezes após o aquecimento do concreto até 500°C, comparando com o concreto de

referência. Esse aumento da permeabilidade foi responsável pela redução do efeito *spalling* do material.

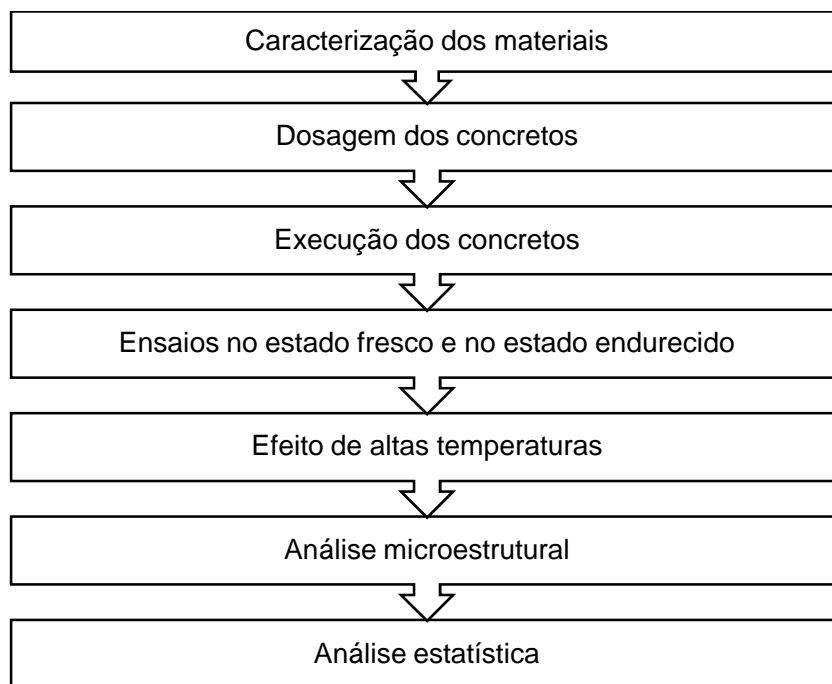
Xiong e Liew (2015) realizaram um estudo para verificar o efeito de altas temperaturas em concretos de alto desempenho reforçados com fibras de polipropileno, com dosagens entre 1-3 kg/m³. Nenhuma das amostras com fibras sofreu fragmentação, indicando que o teor de 1 kg/m³ já é suficiente para prevenir o efeito *spalling* em temperaturas de até 800°C. Além disso, as fibras de polipropileno foram efetivas para minimizar a redução da resistência à compressão com elevadas temperaturas (XIONG; LIEW, 2015).

Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) também avaliaram teores de fibras de 1-3 kg/m³ em concretos de alto desempenho. De maneira geral, todos os concretos avaliados tiveram suas propriedades afetadas pela exposição em altas temperaturas. Entretanto, o concreto sem fibras foi mais prejudicado que os demais. Os autores concluíram que o teor de fibras de 1 kg/m³ foi o que apresentou a melhor performance. Além de ser eficiente na exposição em altas temperaturas, este teor de fibras não comprometeu a resistência à compressão e a trabalhabilidade do concreto de alto desempenho.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As etapas do programa experimental para desenvolvimento do estudo sobre concretos de alto desempenho com e sem adição de fibras de polipropileno, estão apresentadas na Figura 10.

Figura 10 - Esquema com o programa experimental da pesquisa.



Fonte: A autora (2019).

Nesta pesquisa, foram analisados cinco traços de concretos, indicados na Tabela 10.

Tabela 10 - Traços de concreto analisados nesta pesquisa.

Sigla	Descrição dos concretos
CC	Concreto convencional
CAD	Concreto de alto desempenho
CAD.1	Concreto de alto desempenho com 1 kg/m ³ de fibras de polipropileno
CAD.2	Concreto de alto desempenho com 2 kg/m ³ de fibras de polipropileno
CAD.3	Concreto de alto desempenho com 3 kg/m ³ de fibras de polipropileno

Fonte: A autora (2019).

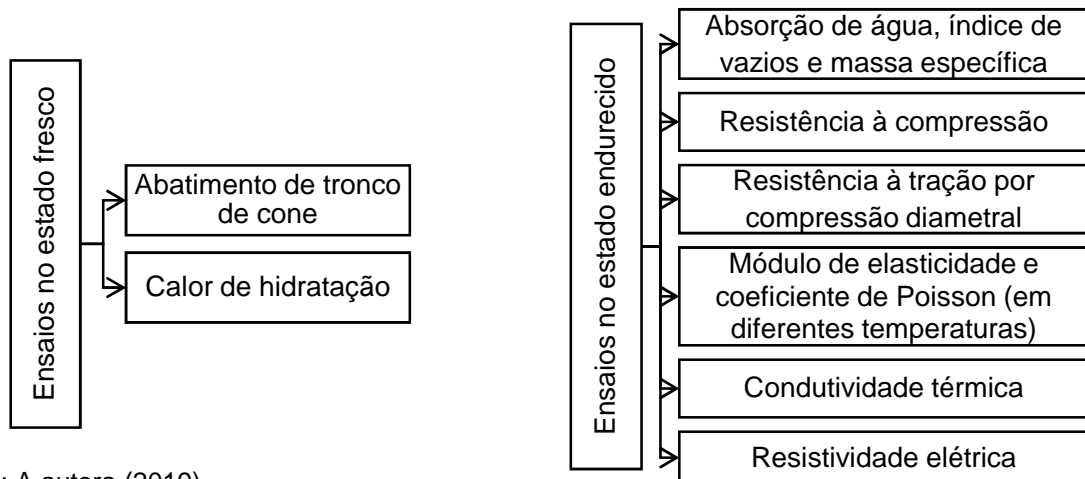
O concreto convencional foi produzido com o objetivo de avaliar seu comportamento em condições de temperatura ambiente e especialmente em elevadas temperaturas, comparando os resultados com os concretos de alto

desempenho. Os materiais foram selecionados de forma que o produto final pudesse representar de maneira geral os concretos utilizados em obras convencionais da região de Joinville-SC.

Para os concretos de alto desempenho, priorizou-se o desenvolvimento de um material com elevada resistência à compressão e boa durabilidade. Para isso, foram utilizados materiais diferenciados, como sílica de casca de arroz, sílica ativa em suspensão e aditivos superplastificantes.

Os ensaios, realizados no estado fresco e no estado endurecido, estão descritos no esquema da Figura 11. Foram confeccionados 37 corpos de prova para cada traço estudado.

Figura 11 - Esquema com os ensaios dos concretos no estado fresco e endurecido.



Fonte: A autora (2019).

Além dos ensaios no estado fresco e endurecido, foi realizado um estudo do efeito de altas temperaturas nas propriedades mecânica dos concretos, com auxílio de um forno com alta capacidade de aquecimento. Foram moldados, no total, 12 corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada traço de concreto em estudo.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados foram: cimento Portland, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita), água, aditivo superplastificante, sílica da casca de arroz, sílica ativa em suspensão e fibras de polipropileno.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na dosagem do concreto convencional foi o CP II Z-32, que possui adição de material pozzolânico.

Para a confecção do CAD, foi utilizado o CPV ARI RS, por ser o cimento com maior teor de clínquer encontrado no mercado (95%), não contém adição de pozolana em sua composição e apresenta adição máxima de 5% de fíler calcário.

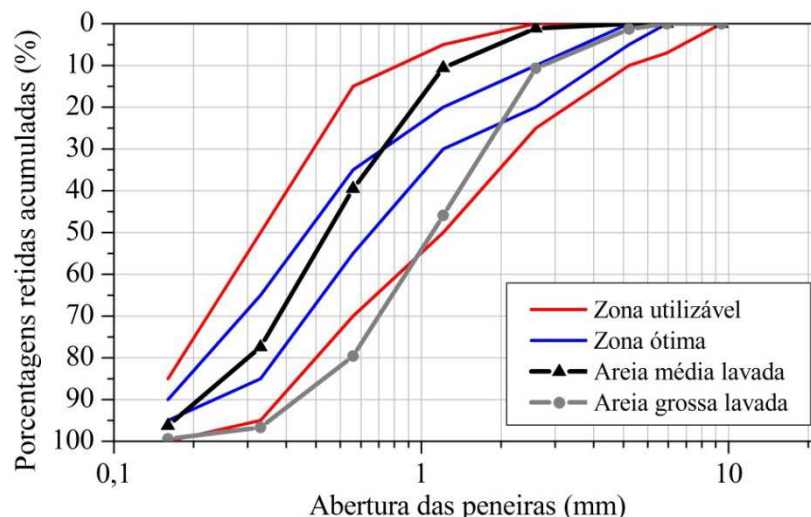
3.1.2 Agregado miúdo

Foram utilizadas areias naturais extraídas da região nordeste de Santa Catarina com diferentes granulometrias: uma areia média com módulo de finura igual a 2,25 e massa específica de 2,56 g/cm³; e uma areia grossa lavada com módulo de finura igual a 3,34 e massa específica de 2,62 g/cm³.

A massa específica das areias foi obtida por meio dos procedimentos definidos na NBR NM 52 (ABNT, 2009a). A determinação da composição granulométrica foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A Figura 12 apresenta as curvas granulométricas das areias, com indicação das zonas ótima e utilizável, apresentadas na NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Figura 12 - Curva granulométrica das areias média e grossa.



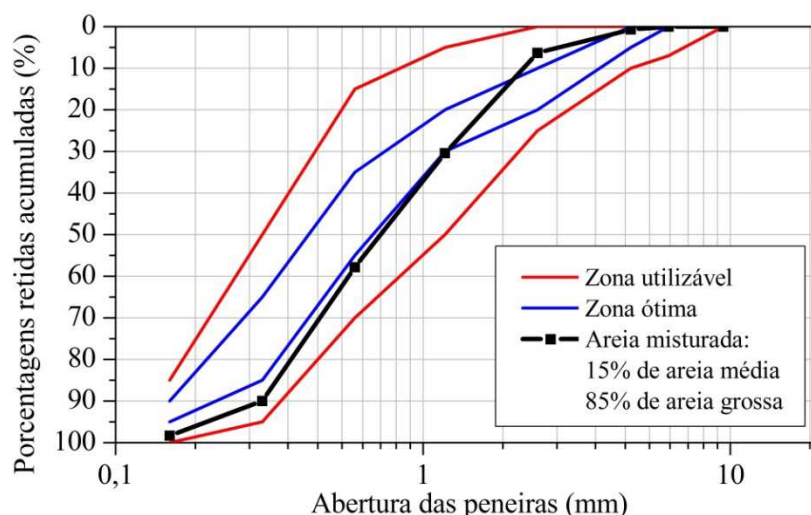
Fonte: A autora (2019).

Observa-se que a areia média, com módulo de finura igual a 2,25, encontra-se dentro da zona utilizável, podendo ser utilizada na produção de concretos. No entanto, a areia grossa lavada está fora da zona de utilização. Dessa forma, foi

necessário misturar uma pequena fração da areia média, distribuindo melhor os grãos ao longo da curva granulométrica.

Na produção do concreto convencional foi utilizado apenas a areia média. Já nas misturas de CAD, os concretos foram produzidos com 85% de areia grossa e 15% de areia média, resultando em um módulo de finura igual a 2,87. A Figura 13 mostra a curva granulométrica da areia obtida. A proporção de 15% de areia média foi suficiente para dispor a curva na zona utilizável, possibilitando a utilização deste agregado na produção dos concretos de alto desempenho. Além disso, o módulo de finura obtido, igual a 2,87, está dentro do intervalo de 2,7 a 3,0, recomendado por Aïtcin (2000) e o intervalo de 2,8 a 3,2, proposto por Neville (2016).

Figura 13 - Curva granulométrica da areia misturada: 15% de areia média e 85% de areia grossa.



Fonte: A autora (2019).

Para utilização no CAD, as areias foram previamente lavadas em uma peneira com abertura de 0,3 mm, para remoção do material pulverulento e das partículas muito finas, com posterior secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$.

No concreto convencional, o material foi utilizado na condição natural, sem nenhum processo de peneiramento, lavagem ou secagem. Neste caso, foi realizada a determinação da umidade superficial com o método do frasco de Chapman, seguindo as especificações da NBR 9775 (ABNT, 2011a). Este ensaio permite identificar a quantidade de água aderente na superfície dos grãos de areia, possibilitando a correção da quantidade de agregado miúdo e água do traço do concreto convencional.

3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto convencional foi uma brita 0 de gnaíse, disponível na região de Joinville-SC. O material possui massa específica igual a $2,80 \text{ g/cm}^3$, módulo de finura de 5,99, diâmetro máximo igual a 12,5 mm e abrasão Los Angeles igual a 17,08%.

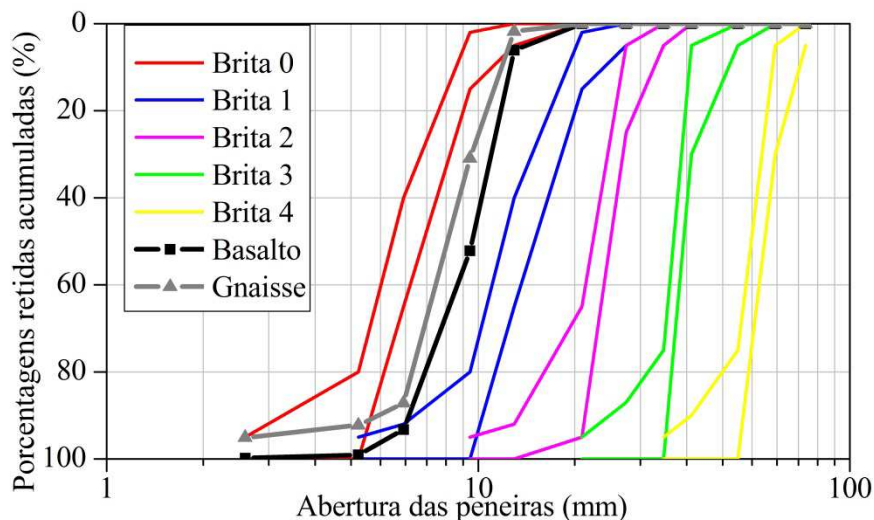
A massa específica das britas foi determinada por meio da NBR NM 53 (ABNT, 2009c). A determinação da composição granulométrica foi realizada seguindo as especificações da NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A abrasão Los Angeles foi obtida pela NBR NM 51 (ABNT, 2001). O ensaio mede a resistência ao desgaste por abrasão obtida pelo impacto entre os agregados e esferas de aço padronizadas que giram num tambor, com velocidade controlada de 30 a 33 rotações por minuto.

Para os concretos de alto desempenho foi escolhida a brita de basalto, disponível na região de Lages-SC, com massa específica igual a $2,62 \text{ g/cm}^3$, módulo de finura igual a 6,49 e diâmetro máximo igual a 12,5 mm.

A abrasão Los Angeles da brita de basalto foi de 13,56%, valor menor que a brita de gnaíse. Isso indica que a mineralogia de basalto apresenta maior resistência ao desgaste do que o gnaíse, sendo mais adequado para a produção de concretos de alto desempenho, visto que o desgaste da brita tem grande influência nas propriedades do CAD. As curvas granulométricas das britas estão apresentadas na Figura 14.

Figura 14 - Curva granulométrica das britas utilizadas no programa experimental.



Fonte: A autora (2019).

Para utilização nos concretos de alto desempenho, as britas foram previamente lavadas em uma peneira com abertura de 2,36 mm e posteriormente secas ao ar por 48 horas.

3.1.4 Água

A água utilizada foi fornecida pela concessionária local, com pH entre 6,6 e 7,0, de acordo com o relatório anual da Companhia Águas de Joinville (CAJ, 2016).

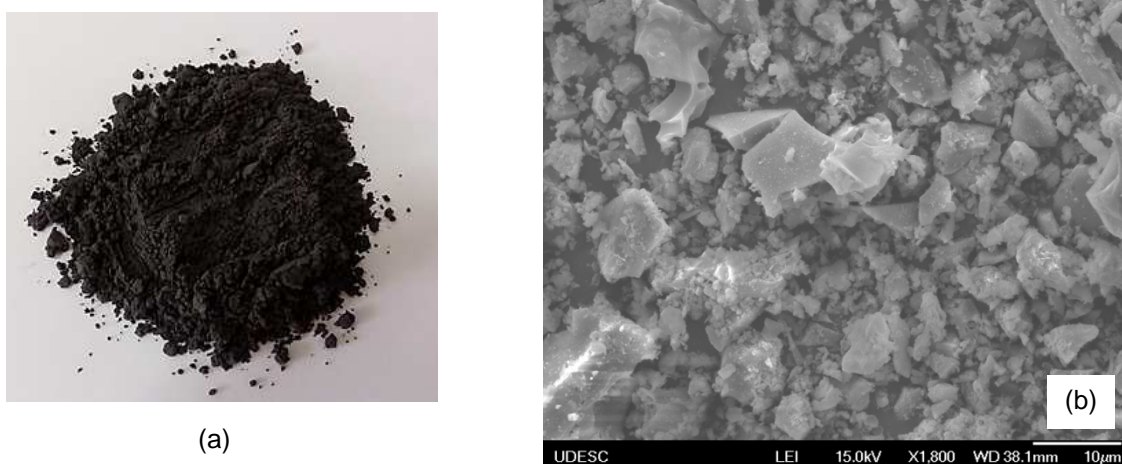
3.1.5 Aditivo superplastificante

Para a realização das misturas de concreto de alto desempenho foi utilizado o aditivo superplastificante MasterGlenium® ACE 407, fornecido pela empresa BASF, à base de éter policarboxilatos, com massa específica de 1,11 g/cm³.

3.1.6 Sílica ativa

Nos concretos de alto desempenho foi utilizada sílica ativa (Figura 15) da empresa Silcca Nobre, proveniente da queima controlada da casca de arroz em sistema de combustão via leito fluidizado. A tecnologia de combustão utilizada para a obtenção deste produto, além de melhorar a eficiência da queima, permite a extração da casca de arroz no seu formato amorfo, aumentando sua reatividade.

Figura 15 - Sílica ativa da casca do arroz: (a) Aparência; (b) MEV com ampliação de 1800 vezes.

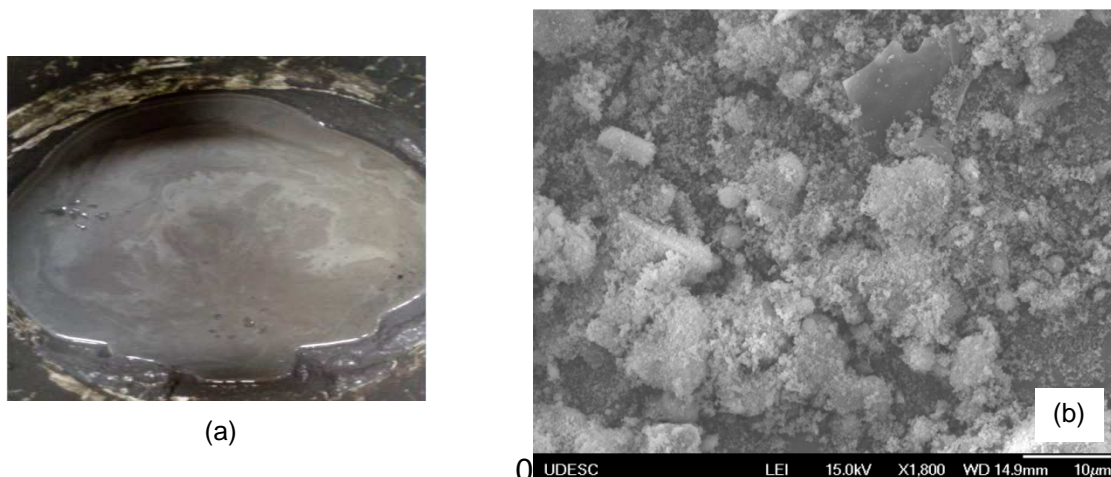


Fonte: A autora (2019).

Além desta adição mineral, também foi utilizado sílica ativa em suspensão (Figura 16), disponibilizada pela empresa MC Bauchemie (*Centrilit Fume S*). Trata-

se de uma suspensão estável de partículas de sílica ativa dispersas em água. Segundo o fabricante, o produto possibilita um aumento na massa específica e resistência à compressão do concreto.

Figura 16 - Sílica ativa em suspensão: (a) Aparência; (b) MEV com ampliação de 1800 vezes.



Fonte: A autora (2019).

O material é fornecido pronto para o uso. Sua composição em massa corresponde a 50% de sílica ativa e 50% de água. Dessa forma, foi necessário realizar uma correção no traço dos concretos, descontando a quantidade da água de amassamento que já estava incluída neste produto.

A composição química dos dois materiais foi determinada pelo ensaio de espectroscopia por fluorescência de raios X (FRX). Esta técnica não destrutiva permite identificar os elementos presentes em uma amostra e estabelecer a concentração de cada um deles (DAL MOLIN, 2010). O equipamento utilizado é de fabricação da SHIMADZU. Os resultados foram indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Composição química da sílica da casca de arroz e da sílica ativa em suspensão.

Sílica da casca do arroz		Sílica ativa em suspensão	
Composição	Teor em massa (%)	Composição	Teor em massa (%)
SiO ₂	88,25	SiO ₂	71,95
K ₂ O	2,59	Fe ₂ O ₃	11,64
SO ₃	1,22	CaO	3,58
CaO	1,07	K ₂ O	2,17
P ₂ O ₅	0,91	SO ₃	1,85
MnO ₂	0,64	Al ₂ O ₃	1,14
Fe ₂ O ₃	0,10	P ₂ O ₅	0,72
Perda ao fogo	5,22	MnO ₂	0,51
-	-	BaO	0,42
-	-	Perda ao fogo	6,02

Fonte: A autora (2019).

Nota-se um elevado teor de dióxido de silício (SiO_2) nos dois materiais. A sílica ativa em suspensão ainda possui quantidades expressivas de óxido de ferro (Fe_2O_3).

Na Tabela 12 são indicadas as propriedades químicas exigidas para um material pozzolânico, de acordo com a NBR 12653 (2014b) e a ASTM C618-17 (ASTM, 2017). Pode-se observar que as duas adições minerais atenderam a todos os critérios exigidos pelas duas normas, comprovando sua pozzolanicidade.

Tabela 12 - Verificação das propriedades químicas da sílica da casca de arroz e da sílica ativa em suspensão de acordo com a NBR 12653 e ASTM C618-17.

Propriedades	NBR 12653	ASTM C618-17	Sílica da casca de arroz analisada	Sílica ativa em suspensão
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70\%$	$\geq 70\%$	88,36%	84,73%
SO_3	$\leq 4\%$	$\leq 4\%$	1,22%	1,85%
Teor de umidade	$\leq 3\%$	$\leq 3\%$	-	-
Perda ao fogo	$\leq 10\%$	$\leq 10\%$	5,22%	6,02%

Fonte: A autora (2019).

A atividade pozzolânica também foi verificada com a determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, de acordo com os procedimentos da norma NBR 5752 (ABNT, 2014b).

Este ensaio consiste na verificação da resistência à compressão de duas argamassas: uma argamassa de referência com cimento CP II F-32, areia normal e água; e uma argamassa com 25% de substituição em massa de cimento pelo material pozzolânico a ser analisado.

Para a sílica ativa em suspensão, foi necessário realizar uma adaptação na nos procedimentos de ensaio, visto que a metodologia apresentada pela norma aplica-se apenas para materiais no estado sólido, como é o caso da sílica da casca do arroz.

Considerando que a composição em massa da sílica em suspensão corresponde a 50% de água e 50% de materiais sólidos (sílica), foi realizada uma ponderação no valor da quantidade de material pozzolânico apresentada na norma, de forma que fosse mantido o valor de 25%, em massa, da quantidade do cimento na parte sólida do produto (sílica). Além disso, foi realizada uma correção na quantidade de água da mistura, subtraindo a quantidade que já estava presente na sílica ativa em suspensão. Os demais componentes da argamassa (areia e cimento)

não foram alterados. A quantidade de materiais utilizada para cada argamassa, em massa, está indicada na Tabela 13.

Tabela 13 - Quantidade de material, em massa, para realização do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland da sílica da casca do arroz.

Material	Argamassa de referência	Argamassa com 25% de sílica da casca do arroz	Argamassa com 25% de sílica ativa em suspensão
Cimento CP II F-32	624 g	468 g	468 g
Material pozzolânico	-	156 g	312 g ¹
Areia normal ²	1872 g	1872 g	1872 g
Água	300 g	300 g	144 g

¹ Massa do produto no estado líquido.

² Quatro frações de 468 g - Areia fina, média fina, média grossa e grossa.

Fonte: Adaptado de ABNT (2014c).

Além desses materiais, foi necessário utilizar aditivos superplastificantes para garantir que o índice de consistência das argamassas de referência fosse mantido igual ao índice de consistência das argamassas com 25% de sílica.

As argamassas foram confeccionadas segundo a NBR 7215 (ABNT, 1996). Foram moldados 5 corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm para cada mistura (Figura 17).

Figura 17 - Corpos de prova do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland. (a) argamassa de referência; (b) argamassa com 25% de substituição de sílica ativa em suspensão.

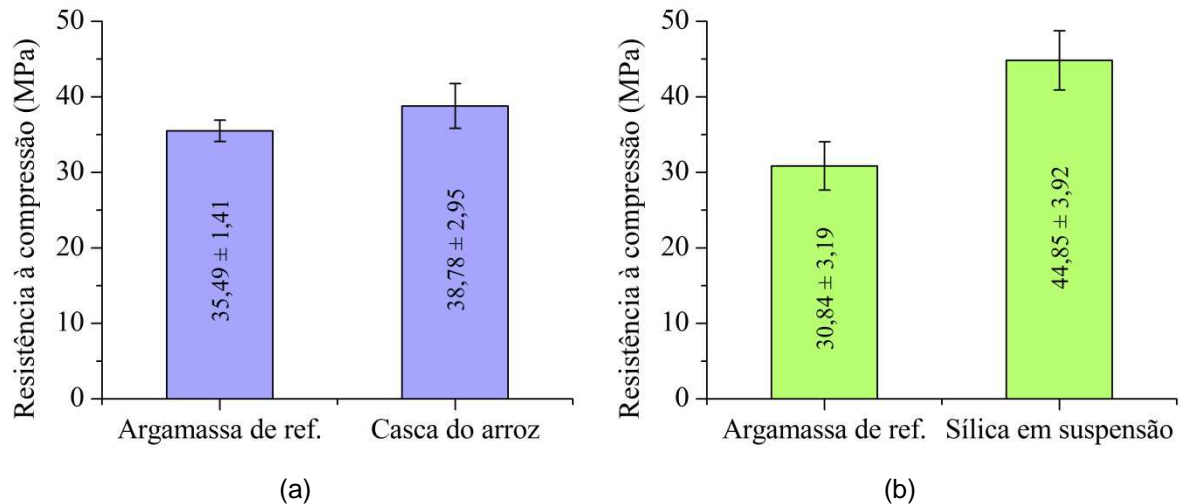


Fonte: A autora (2019).

Os corpos de prova foram mantidos em um tanque com água saturada de hidróxido de cálcio, a 23°C, até a verificação da resistência à compressão, aos 28 dias.

Os resultados da resistência à compressão, com seus respectivos desvios padrão, estão ilustrados na Figura 18.

Figura 18 - Resultados do ensaio de determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: (a) Sílica da casca do arroz; (b) Sílica ativa em suspensão.



Fonte: A autora (2019).

A sílica da casca do arroz e sílica ativa em suspensão apresentaram índices de desempenho iguais a 109,27% e 142,17%, respectivamente. Ambos os resultados foram superiores ao valor mínimo de 90% estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014c).

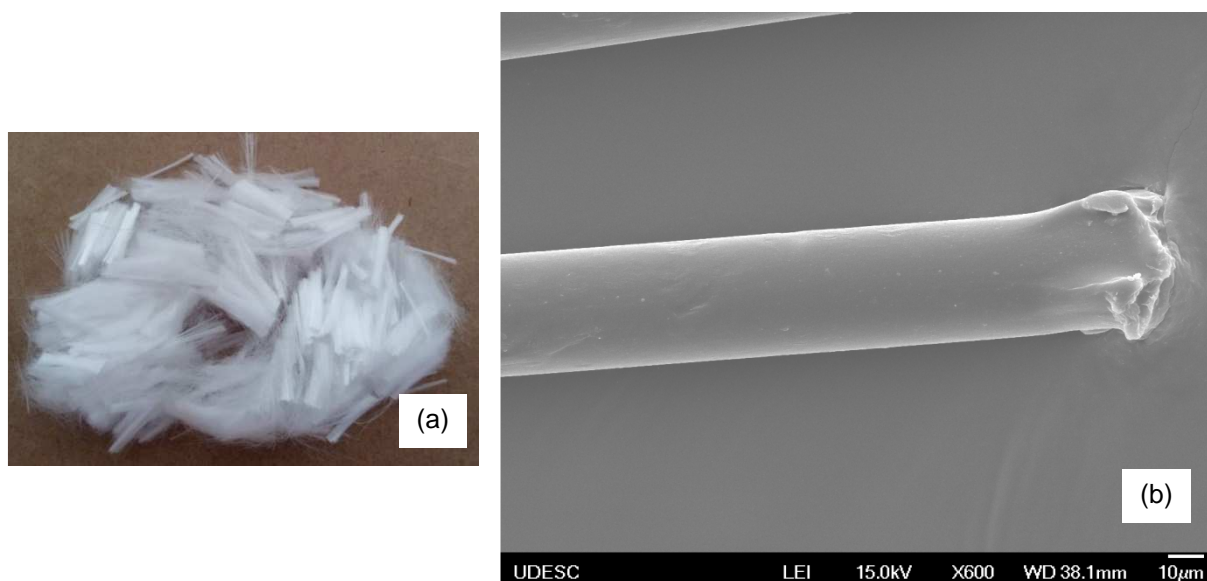
No caso da sílica ativa em suspensão, deve-se considerar que as modificações nos procedimentos da norma, necessárias para a realização deste ensaio, podem ter influenciado no resultado final.

A análise conjunta da composição química, dada pelo FRX, e do índice de desempenho com cimento Portland, comprovou que as duas adições minerais analisadas apresentam atividade pozolânica e podem ser utilizadas como substituto parcial do cimento Portland na produção dos concretos de alto desempenho.

3.1.7 Fibras de polipropileno

As microfibras de polipropileno (Figura 19) foram disponibilizadas pela empresa Neomatex. As dosagens utilizadas foram de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³, com base nas referências previamente apresentadas.

Figura 19 - Microfibras de polipropileno: (a) Aparência; (b) MEV com ampliação de 600 vezes.



Fonte: A autora (2019).

As propriedades físicas do material, fornecidas pelo fabricante estão descritas na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades físicas das microfibras de polipropileno.

PROPRIEDADES FÍSICAS	
Comprimento	12 mm
Diâmetro	30 µm
Frequência	130 milhões de fibras/kg
Área superficial específica	147 m ² /kg
Densidade	0,91

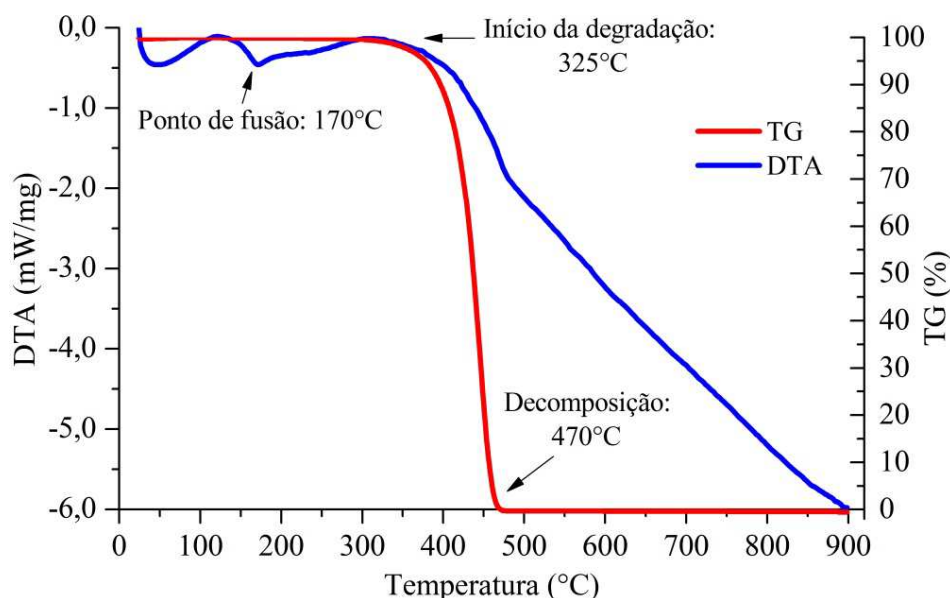
Fonte: Adaptado de Neomatex (2016).

O resultado do ensaio da análise térmica das microfibras de polipropileno é apresentado na Figura 20. Foi realizada a análise térmica diferencial (DTA) e termogravimetria (TG), com auxílio de um equipamento Netzsch STA 449C.

A DTA permite analisar mudanças endotérmicas e exotérmicas que ocorrem com a variação da temperatura em um material. É medida a diferença de temperatura entre a amostra em estudo e um material de referência, quando ambos são submetidos ao mesmo processo de aquecimento. Já a TG é utilizada para determinar as mudanças na massa de uma amostra em função da temperatura ou do tempo (DAL MOLIN, 2010).

O ensaio foi realizado com taxa de aquecimento de 10°C/min em um ambiente controlado de gás inerte (nitrogênio), entre as temperaturas de 25°C e 900°C.

Figura 20 - Análise térmica das microfibras de polipropileno.



Fonte: A autora (2019).

Observa-se no gráfico, no primeiro pico da curva de DTA, que o ponto de fusão da fibra de polipropileno é igual a 170°C. O valor obtido é compatível com as temperaturas de 170°C e 175°C, apresentadas por Ozawa e Morimoto (2015) e Callister (2012).

É possível visualizar na curva de TG que o início da degradação e a decomposição das fibras ocorrem nas temperaturas de 325°C e 470°C, respectivamente. Ozawa e Morimoto (2015) obtiveram as temperaturas de 341°C e 447°C, semelhantes aos resultados das microfibras analisadas neste estudo.

3.2 DOSAGEM

A dosagem do concreto convencional foi realizada por meio da metodologia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo IPT/USP, com alterações de Campitelli (2004). O método é bastante simples e eficiente. Além de definir o traço inicial do concreto, a metodologia permite realizar adequações em

laboratório quanto à consistência (abatimento de tronco de cone) e/ou coesão, modificando alguns parâmetros de cálculo.

A resistência característica à compressão (f_{ck}) adotada para cálculo do traço do concreto convencional foi 25 MPa e o abatimento de tronco de cone foi estabelecido em 10 ± 2 cm, para aplicação em pilares e vigas.

A dosagem dos concretos de alto desempenho envolveu inúmeros procedimentos de otimização, detalhados na Fase 1 dos resultados, com objetivo de produzir um concreto com elevada resistência à compressão.

A Tabela 15 apresenta a dosagem dos materiais, em massa, para produção de 1 m³ de concreto.

Tabela 15 - Dosagem dos materiais utilizados para confecção de 1 m³ de concreto.

Componente (kg/m ³)	CC	CAD	CAD.1	CAD.2	CAD.3
Cimento Portland (CP II Z-32)	489	-	-	-	-
Cimento Portland (CPV ARI RS)	-	560	560	560	560
Areia média	656	103	103	103	103
Areia grossa	-	582	582	582	582
Brita de gnaiss	998	-	-	-	-
Brita de basalto		1080	1080	1080	1080
Água	225	136	136	136	136
Sílica da casca do arroz	-	43	43	43	43
Sílica ativa em suspensão ¹	-	56	56	56	56
Aditivo superplastificante	-	5,6	5,6	5,6	5,6
Microfibras de polipropileno	-	-	1	2	3
Relação água/cimento ²	0,46	0,29	0,29	0,29	0,29
Relação água/materiais cimentícios ^{2,3}	0,46	0,26	0,26	0,26	0,26

¹ Composição: 50% de sílica ativa e 50% de água

² O cálculo da relação água/cimento e relação água/materiais cimentícios incluiu a quantidade de água presente na sílica ativa em suspensão.

³ Materiais cimentícios: cimento Portland, sílica da casca do arroz e a fração da sílica ativa em suspensão correspondente à sílica ativa.

Fonte: A autora (2019).

3.3 EXECUÇÃO DOS CONCRETOS

A execução dos concretos envolveu as seguintes etapas: produção, moldagem dos corpos de prova, adensamento e cura.

3.3.1 Produção dos concretos

Todos os materiais foram previamente pesados e separados conforme o traço estabelecido. A mistura foi realizada em betoneira de eixo inclinado, previamente umedecida, com capacidade de 120 litros.

A produção dos concretos foi realizada conforme recomendações da NBR 12821 (ABNT, 2009d). Com o eixo inclinado, foi adicionado primeiro o agregado gráudo e parte da água de amassamento. Em seguida, com a betoneira já ligada, foram introduzidos o cimento e o agregado miúdo. Nos concretos de alto desempenho, a sílica da casca do arroz e a sílica ativa em suspensão foram dispostas logo após a colocação da areia. Por fim, foi adicionado o restante da água.

A adição do aditivo nos concretos de alto desempenho foi realizada após a colocação de toda a água de amassamento, somente quando todo o material seco estava hidratado.

Finalizada a colocação dos materiais, a betoneira permaneceu ligada por 3 minutos, com um posterior repouso de 3 minutos e mais 2 minutos de mistura, conforme recomendação da NBR 12821 (ABNT, 2009d).

Nos concretos com fibras, elas foram adicionadas após os três primeiros minutos de mistura e três minutos de repouso. Após sua adição, a betoneira ficou ligada por mais 5 minutos, para completa homogeneização e dispersão das fibras, por recomendação do fabricante.

3.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova foram realizados de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram utilizados moldes cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, revestidos internamente com uma fina camada de lubrificante, não reagente com o concreto. Para os ensaios de condutividade térmica e resistividade elétrica foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões (largura x altura x comprimento) de 10 cm x 5 cm x 10 cm e 10 cm x 10 cm x 17 cm, respectivamente, para atender as especificações do instrumento de medição.

A quantidade de corpos de prova definida para cada ensaio está indicada na Tabela 16.

Tabela 16 - Quantidade de corpos de prova para cada traço.

Ensaio	Formato do corpo de prova	Quantidade por traço	Quantidade total
Absorção de água	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	3	15
Índice de vazios	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	3	15
Massa específica	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	3	15
Condutividade térmica	Prismático (10 cm x 5 cm x 10 cm)	2	10
Resistência à compressão	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	4 → 7 dias	20 → 7 dias
		4 → 28 dias	20 → 28 dias
		4 → 91 dias	20 → 91 dias
Resistência à tração por compressão diametral	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	4 → 7 dias	20 → 7 dias
		4 → 28 dias	20 → 20 dias
Quantidade total	-	25	125
Ensaio especiais (realizados com apenas alguns concretos)			
Módulo de elasticidade ¹	Cilíndrico (10 cm x 20 cm)	4	4
Resistividade elétrica ²	Prismático (10 cm x 10 cm x 17 cm)	2	4

¹ Realizado com o CAD.2, nas diferentes temperaturas analisadas (T. amb., 200°C, 400°C e 600°C).

² Realizado com o CAD e CC.

Fonte: A autora (2019).

3.3.3 Adensamento

O adensamento do concreto convencional foi realizado de forma manual, segundo a NBR 5738 (ABNT, 2016). Foram aplicados 12 golpes, distribuídos em 2 camadas de concreto.

Nos concretos de alto desempenho, optou-se pelo adensamento mecânico, utilizando mesa vibratória, para minimizar as imperfeições dos corpos de prova. As misturas de CAD foram enquadradas na classe de consistência S10, com abatimento entre 1 cm e 5 cm, tornando obrigatório o adensamento mecânico, conforme especificações da NBR 5738 (ABNT, 2016). Cada amostra foi vibrada durante 1 minuto e 30 segundos, até que o concreto apresentasse um aspecto relativamente liso e praticamente sem bolhas de ar na superfície.

3.3.4 Cura

A cura dos concretos foi realizada em um tanque contendo água saturada de hidróxido de sódio, a 23°C, onde permaneceram até a realização dos ensaios no estado endurecido.

3.4 ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

No estado fresco, foram realizados os ensaios de abatimento de tronco de cone e determinação do calor de hidratação.

3.4.1 Abatimento de tronco de cone

O ensaio de abatimento de tronco de cone, também conhecido como *slump test*, foi realizado com o concreto ainda no estado fresco, seguindo os procedimentos recomendados pela NBR NM 67 (ABNT, 1998).

O molde foi preenchido com 3 camadas de concreto, cada uma adensada com 25 golpes da haste de compactação, distribuindo-os uniformemente sobre a seção de cada camada.

Finalizadas as três camadas, o molde foi retirado, levantando-o cuidadosamente na direção vertical durante um período entre 5 e 10 segundos. Logo em seguida, foi verificado o abatimento do concreto, medindo a diferença entre a altura do molde e a altura do eixo da mistura desmoldada, com auxílio de uma régua metálica (Figura 21).

Figura 21 - Ensaio de abatimento do tronco de cone. (a) CC; (b) CAD.



Fonte: A autora (2019).

3.4.2 Calor de hidratação

O ensaio de calorimetria foi realizado para determinar as mudanças de temperaturas ocorridas ao longo do tempo e o calor de hidratação gerado. Foram analisadas amostras de 350 ml das misturas de CAD e CC, mantidas em um compartimento semi-adiabático por um período superior a 24 horas.

As informações de temperatura do concreto foram coletadas a cada 2 minutos, com auxílio de um calorímetro da marca ImpacLog IP7018, que opera por meio de termopares, fornecendo dados informatizados para geração das curvas de evolução da temperatura do concreto.

3.5 ENSAIOS NO ESTADO ENDURECIDO

Com os concretos no estado endurecido, foram realizados ensaios para avaliar suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas.

3.5.1 Propriedades físicas

A determinação das propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica dos concretos foi realizada por meio do método de imersão e fervura, com base na NBR 9778 (ABNT, 2009e).

3.5.2 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas abordadas nesta pesquisa foram: resistência à compressão, aos 7, 28 e 91 dias, e resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias. O módulo de elasticidade foi realizado apenas com a mistura CAD.2, em temperatura ambiente e nas diferentes temperaturas de aquecimento selecionadas.

3.5.2.1 Resistência à compressão

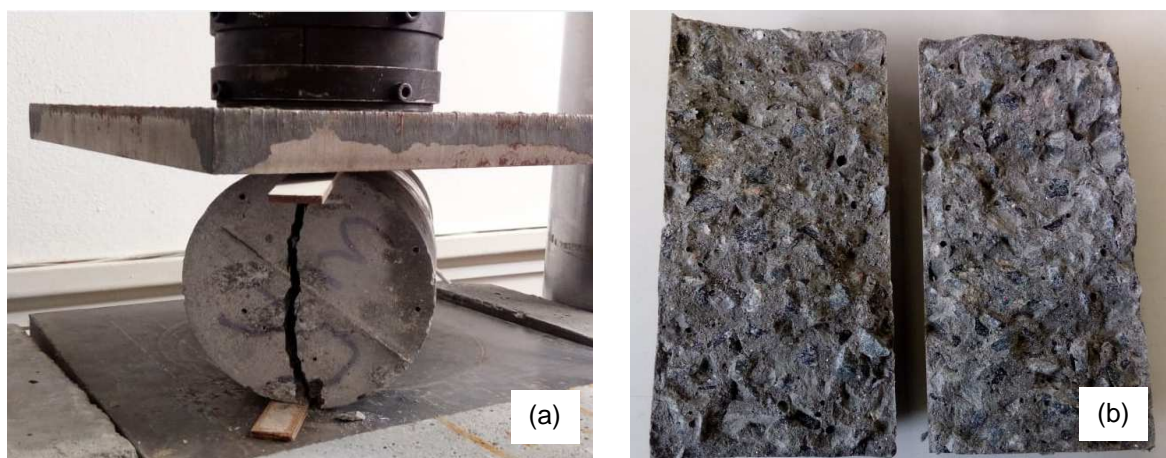
O ensaio de resistência à compressão foi realizado em corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual a 100 mm, com base na NBR 5739 (ABNT, 2018). As amostras foram ensaiadas na condição saturada e suas faces foram previamente retificadas. O carregamento foi aplicado em uma prensa hidráulica com capacidade nominal de 200 toneladas, marca EMIC PC200I.

3.5.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

A resistência à tração foi determinada pelo ensaio por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011b).

O carregamento foi aplicado na mesma prensa hidráulica utilizada para realização do ensaio de resistência à compressão. Cada corpo de prova foi cuidadosamente posicionado no centro da prensa, garantindo que o plano axial definido por geratrizes diametralmente opostas recebesse a carga de compressão. Entre os pratos da máquina e o concreto, foram colocadas duas tiras de chapa dura de fibra de madeira (Figura 22a). A carga foi aplicada continuamente até verificar a ruptura do concreto (Figura 22b).

Figura 22 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral: (a) posicionamento do corpo de prova na prensa hidráulica; (b) corpo de prova rompido.



Fonte: A autora (2019).

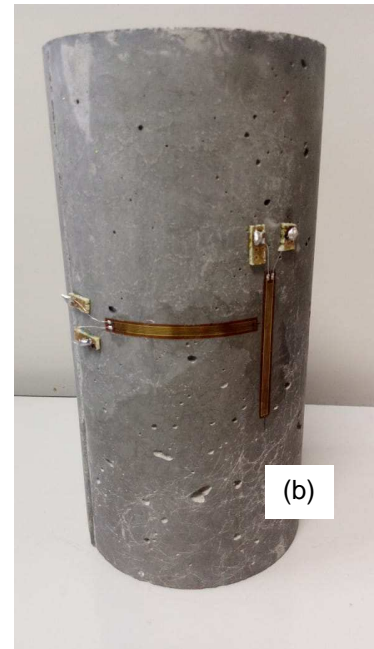
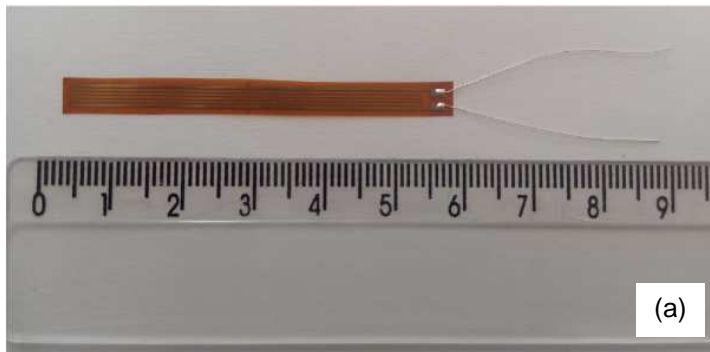
3.5.2.3 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade verificado nesta pesquisa foi o módulo secante, dado pelo coeficiente angular da reta traçada da origem até o ponto da curva tensão-deformação que corresponde a 40% da carga de ruptura.

A metodologia para determinação desta propriedade baseia-se na medição das tensões aplicadas aos corpos de prova e suas respectivas deformações sofridas durante o tempo de carregamento, possibilitando traçar o diagrama tensão-deformação de cada material.

As medições relativas as deformações dos corpos de prova foram realizadas com auxílio de dois extensômetros elétricos de colagem superficial (Figura 23a), fixados na direção longitudinal e transversal do corpo de prova (Figura 23b).

Figura 23 - Ensaio de determinação do módulo de elasticidade: (a) Extensômetro; (b) posicionamento no corpo de prova.



Fonte: A autora (2019).

A Equação (3) apresenta o cálculo do módulo de elasticidade secante do concreto:

$$E_s = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_s} \quad (3)$$

Sendo:

E_s = módulo de elasticidade secante;

σ_s = tensão correspondente a 40% da carga de ruptura;

ε_s = deformação longitudinal no ponto da curva tensão-deformação que corresponde a 40% da carga de ruptura.

Como foram medidas as deformações transversais e longitudinais do concreto, foi possível também calcular o coeficiente de Poisson, por meio da Equação (4):

$$\nu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \quad (4)$$

Sendo:

ν = coeficiente de Poisson;

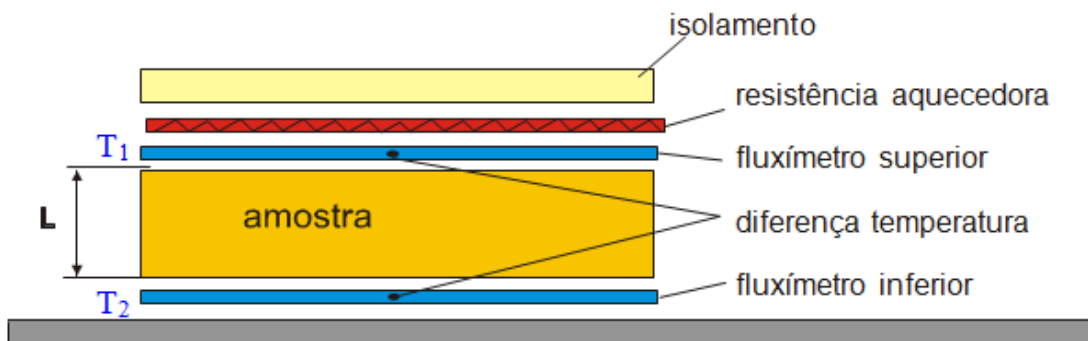
ε_x = deformação transversal;

ε_z = deformação longitudinal.

3.5.3 Propriedades térmicas

A determinação da condutividade térmica do concreto foi realizada em um condutímetro da marca Sensu, modelo K10N, em corpos de prova prismáticos com dimensões de 10 cm x 5 cm x 10 cm (largura x altura x comprimento). Segundo o fabricante, o equipamento foi construído com base nas normas ISO 8301 e ASTM C518 (*Standard test method for steady-state thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus*), mostrado esquematicamente na Figura 24.

Figura 24 - Arranjo experimental para a medição da condutividade térmica.



Fonte: Effting (2008).

A condutividade térmica foi calculada com base na Lei de Fourier, que estabelece uma relação entre a taxa de fluxo de calor e a condutividade térmica de um corpo com espessura definida. A resistência térmica em regime permanente é dada pela Equação (5):

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{q_1 + q_2}{2}\right)} \quad (5)$$

Sendo:

R = resistência térmica em regime permanente, em $\text{m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$;

q_1 e q_2 = taxa de calor medida medida pelos fluxímetros, em $\text{W}.\text{m}^{-2}$;

T_1 e T_2 = temperaturas superficiais da amostra, em Kelvin.

Considerando que a amostra é homogênea, é possível determinar a condutividade térmica do material pela Equação (6):

$$\lambda = \frac{L}{R} \quad (6)$$

Sendo:

λ = condutividade térmica, em $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

L = espessura da amostra, em metros;

R = resistência térmica, em $\text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$.

3.5.4 Resistividade elétrica do concreto

A determinação da resistividade elétrica foi realizada no concreto convencional e no concreto de alto desempenho sem fibras, com objetivo de verificar o potencial de corrosão das duas misturas. Além de comparar o desempenho destes dois materiais, buscou-se observar a influência do sulfato de sódio na resistividade elétrica dos concretos, simulando sua durabilidade em ambientes agressivos, onde ocorrem respingos de maré.

Foram moldados 2 corpos de prova prismáticos de 10 cm x 10 cm x 17 cm para cada uma das misturas analisadas (CC e CAD), com as mesmas medidas utilizadas por Hoppe (2005) e Rosa (2005).

Inicialmente, todos os corpos de prova foram mantidos em um taque com água saturada de hidróxido de sódio durante 28 dias. Em seguida, uma das amostras foi submetida a ciclos de molhagem e secagem em solução salina contendo 10% de sulfato de sódio (Na_2SO_4), enquanto que a outra amostra foi deixada em condições ambiente.

Os ciclos de molhagem e secagem compreendem 3 dias de imersão completa em solução contendo 10% de Na_2SO_4 e 4 dias de secagem em estufa. Apesar da concentração usual do ensaio ser igual a 3,5%, no estudo desenvolvido por Silva (2006) observou-se que os concretos de alto desempenho apresentam uma permeabilidade muito baixa, de forma que o teor de 3,5% não induziu o processo corrosivo nos corpos de prova após 19 meses de ensaio. Porém, após o aumento do teor de Na_2SO_4 para 10%, os resultados foram mais evidentes. Sendo assim, optou-se por utilizar a concentração de 10%, para acelerar os resultados.

O método utilizado para determinação da resistividade elétrica foi o método dos quatro eletrodos, ou método de Wenner, adaptado para uso em concreto. Os procedimentos desenvolvidos foram indicados por Hoppe (2005) e Rosa (2005).

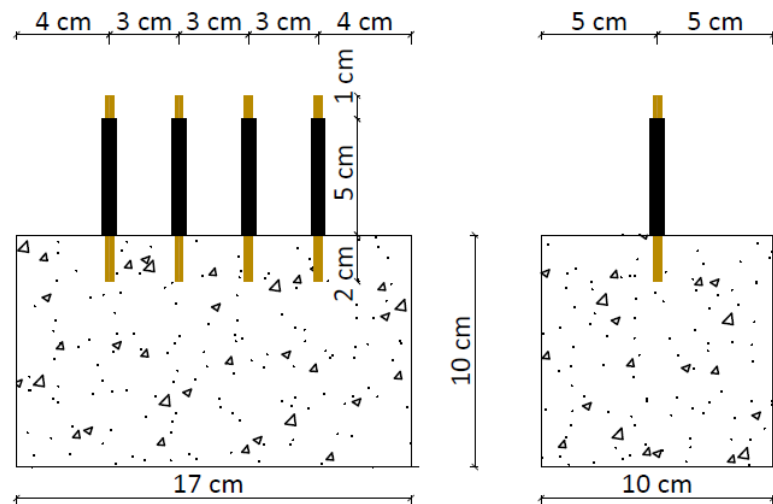
Para confecção dos eletrodos, foram utilizados fios de cobre rígidos, com seção de 10 mm². A Figura 25 apresenta o detalhe dos corpos de prova utilizados no ensaio e o posicionamento e distribuição dos eletrodos no concreto.

A resistividade elétrica é medida a uma profundidade correspondente à distância entre os eixos dos eletrodos. Neste estudo, o valor adotado corresponde a uma profundidade de 3 cm, o que representa, em termos de durabilidade a região mais crítica de uma estrutura, a região do recobrimento da armadura.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014a), este cobrimento é utilizado para uma classe de agressividade ambiental moderada (classe II), equivalente a ambientes urbanos, com risco pequeno de deterioração das estruturas. Apesar disso, a classe correspondente a respingos de maré é a classe IV, com agressividade muito forte, onde o cobrimento mínimo de vigas e pilares deve ser igual a 5 cm.

Considerando que o objetivo deste ensaio é verificar se o concreto de alto desempenho apresenta durabilidade elevada quanto ao potencial de corrosão, optou-se por utilizar a situação mais crítica, adotando um cobrimento inferior (3 cm) e uma agressividade muito forte.

Figura 25 - Detalhe dos corpos de prova utilizados para o ensaio da resistividade elétrica.



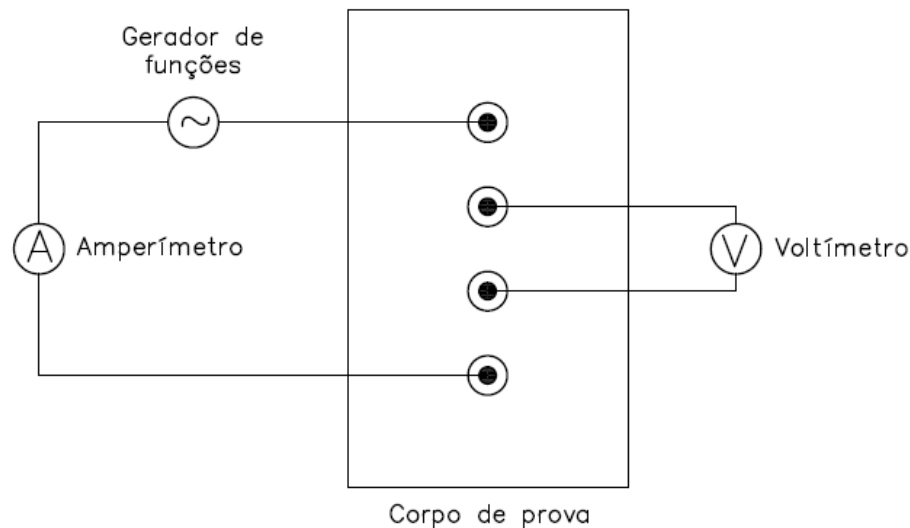
Fonte: A autora (2019).

O ensaio foi realizado com auxílio de um gerador de funções de corrente alternada e dois multímetros, com alta impedância de entrada. A Figura 26 apresenta um esquema do circuito elétrico desenvolvido.

O gerador de funções foi utilizado com corrente alternada de onda senoidal, a uma frequência fixa de 10 Hz. A diferença de potencial entre os eletrodos extremos

foi fixada em $5V_{RMS}$ (valor eficaz), ajustando o gerador de funções até chegar neste valor. Em seguida, foi feita a leitura da corrente elétrica nos eletrodos externos e da diferença de potencial nos eletrodos internos.

Figura 26 - Esquema do circuito utilizado para o ensaio de resistividade elétrica.



Fonte: A autora (2019).

As medições de resistividade elétrica foram realizadas periodicamente, iniciando aos 7 dias após a moldagem dos corpos de prova.

A NBR 7117 (ABNT, 2012b) indica a Equação (7) para o cálculo da resistividade elétrica nos casos em que os eletrodos são cravados no material, a uma profundidade superior a 10% da distância de separação entre os eletrodos:

$$\rho = \frac{4 \pi a V}{\left(1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) \cdot I} \quad (7)$$

Sendo:

ρ = Resistividade elétrica do concreto, em ohm.cm;

V = Diferença de potencial, em volts;

I = Intensidade de corrente, em amperes;

a = Distância de separação entre eixos dos eletrodos, em centímetros;

b = Profundidade de penetração dos eletrodos no concreto, em centímetros.

3.6 EFEITO DE ALTAS TEMPERATURAS NO CONCRETO

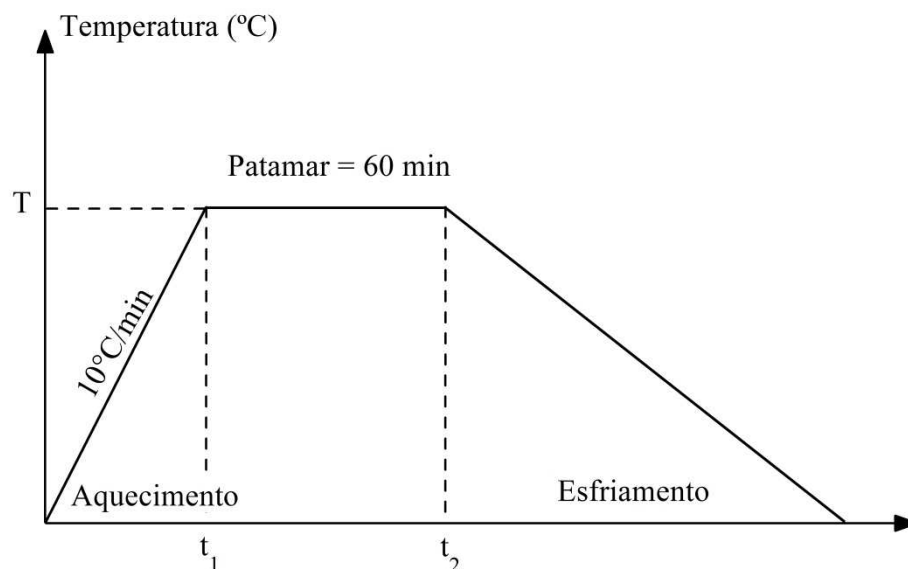
O estudo do efeito de altas temperaturas no concreto teve por finalidade investigar a resistência à compressão residual de concretos de resistência convencional e de alto desempenho, sem fibras e com a adição de 1 kg/m³, 2 kg/m³ e 3 kg/m³ de microfibras de polipropileno, após a exposição a elevadas temperaturas.

Para realização deste ensaio, foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura para cada mistura de concreto em estudo.

Os corpos de prova foram mantidos em um tanque com água durante 28 dias, garantindo boas condições de cura. Posteriormente, as amostras foram retiradas do tanque e permaneceram ao ar livre durante 10 dias, com a finalidade de reduzir o seu teor de umidade, buscando atingir o equilíbrio higroscópico com o ambiente.

Os concretos foram aquecidos em um forno do tipo mufla. A taxa de aquecimento adotada foi de 10°C/min, o que corresponde ao valor médio aproximado da taxa de aquecimento nos primeiros 120 minutos da curva de incêndio-padrão, definida pela ISO 834 (ISO, 1999). Uma vez atingido o patamar de temperatura desejado, os corpos de prova foram mantidos nesta temperatura durante 60 minutos (Figura 27), seguindo as recomendações do RILEM 129 (RILEM, 1995). As temperaturas analisadas foram: 100°C, 200°C, 300°C, 400°C e 600°C.

Figura 27 - Esquema do aquecimento dos corpos de prova.



Fonte: A autora (2019).

Após aquecimento nas temperaturas selecionadas, os corpos de prova foram resfriados naturalmente até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, foi realizada a verificação da resistência à compressão residual e determinação da perda de massa do concreto. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada faixa de temperatura selecionada, além de 3 corpos de prova para verificação das propriedades de concretos sem aquecimento, totalizando 12 corpos de prova para cada traço estudado.

Para a mistura CAD.2, que contém 2 kg/m³ de fibras de polipropileno, foram realizados também ensaios adicionais para a determinação de resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

3.7 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para realizar o acompanhamento da microestrutura, foram obtidas imagens utilizando um microscópio eletrônico de varredura da marca e modelo JEOL JSM 6400, associado a um Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS).

Os fragmentos analisados foram retirados de corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão. Foram analisadas amostras planas, embutidas em resina, com posterior processo de polimento e amostras secas, sem embutimento.

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos experimentalmente foram submetidos a análises estatísticas, incluindo análise de variância e intervalos de confiança, realizadas com auxílio do programa R (R CORE TEAM, 2017).

Foi realizada uma Análise de Variância (em inglês, *Analysis of Variance* - ANOVA), para verificar o efeito das fibras na resistência à compressão e na resistência à tração do concreto. O nível de significância considerado foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

Além disso, foram determinados os intervalos de confiança para a média da resistência à compressão e à tração, com reamostragens *Bootstrap*. Foi utilizado o pacote 'Boot' (DAVISON; HINKLEY, 1997; CANTY; RIPLEY, 2017) do programa R.

A técnica de *Bootstrap*, proposta pela primeira vez por Efron (1994), é um método computacional que simula a experimentação, reutilizando os dados originais. Na reamostragem *Bootstrap*, uma amostra é obtida retirando amostras aleatórias de tamanho n , com reposição, a partir dos N dados originais. Para cada amostra *Bootstrap* (de tamanho n), a estatística de interesse, neste caso a média, é calculada. Esta estatística é chamada de replicação *Bootstrap*. O processo é repetido várias vezes para gerar B amostras *Bootstrap* e respectivas replicações. A amostra das replicações de *Bootstrap* (tamanho B) é usada para construir intervalos de confiança para a estatística de interesse, neste caso, para a média amostral (KASS; EDEN; BROWN, 2014; DI BELLA; WRYZKOWSKI; LURA, 2016; SOTO-IZQUIERDO; ANTONIO-RAMALHO, 2016).

Comparada com as inferências estatísticas clássicas baseadas em condições de normalidade, a reamostragem *Bootstrap* é mais generalizada e versátil, e pode ser aplicada de maneira eficiente para estimativa de intervalo de confiança de dados experimentais (DAUJI; BHARGAVA, 2016).

O método tem apresentado bons resultados no cálculo da estimativa de resistência à compressão de concretos convencionais e de alto desempenho (ERDAL; KARAKURT; NAMLI, 2013; SOTO-IZQUIERDO; ANTONIO-RAMALHO, 2016; DAUJI; BHARGAVA, 2016; YOUNG *et al.*, 2019). Comparada com a estimativa pontual, a metodologia *Bootstrap* para estimativa do intervalo de confiança da resistência à compressão de concretos, a partir de dados experimentais limitados, trouxe uma melhor confiança nas propriedades avaliadas (DAUJI; BHARGAVA, 2016).

Os intervalos de confiança da resistência à compressão foram definidos pelo método dos percentis, com um nível de confiança de 95% e 500 reamostragens *Bootstrap*.

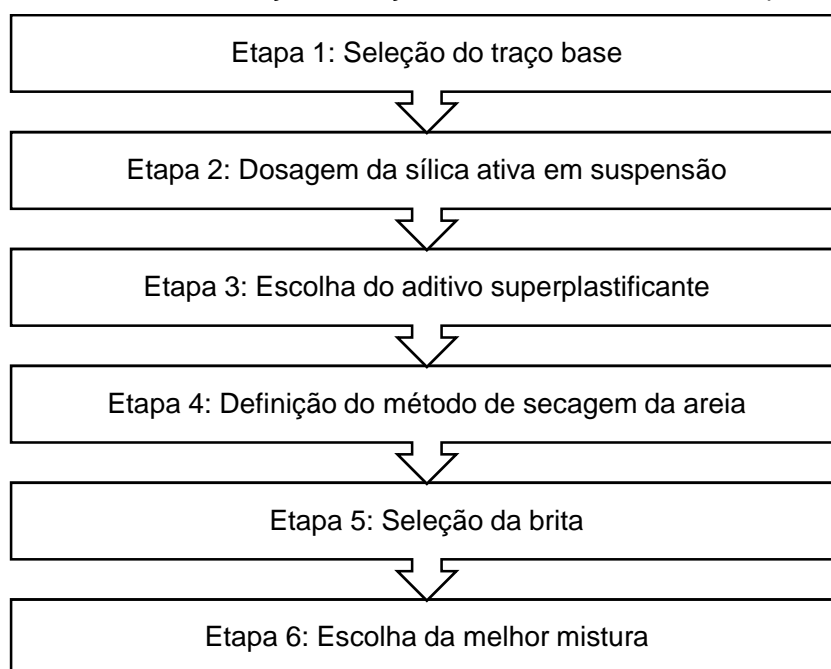
O intervalo de confiança de $100(1 - \alpha)\%$, pelo método dos percentis, para o valor verdadeiro do parâmetro desconhecido da população, é dado pelos dois valores que incluem o centro $100(1 - \alpha)\%$ desta distribuição. Assim, um intervalo de confiança de 95% é dado pelos percentis de 2,5% e 97,5% da distribuição gerada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE 1

Na fase inicial da pesquisa foram realizados diversos procedimentos de otimização do traço dos concretos de alto desempenho, a fim de obter elevada resistência à compressão.

As etapas desenvolvidas estão enumeradas no esquema da Figura 28 e descritas a seguir.

Figura 28 - Procedimentos de otimização do traço dos concretos de alto desempenho.



Fonte: A autora (2019).

4.1 SELEÇÃO DO TRAÇO BASE

Foram selecionados dois traços de concretos de alto desempenho para servir de base para os testes preliminares: o traço 1, adaptado de Mehta e Monteiro (2014); e o traço 2, adaptado de Neville (2016). As quantidades de cada material, em massa, para produção de 1 m³ de concreto, estão indicadas na Tabela 17.

Com base nestes dois traços, foram realizadas diversas misturas variando a quantidade de sílica ativa em suspensão, tipo do aditivo superplastificante e mineralogia da brita, conforme descrito nas etapas seguintes.

Tabela 17 - Traços avaliados na etapa de otimização.

Componente (kg/m ³)	Traço 1	Traço 2
Cimento Portland (CPV ARI RS)	487	513
Areia	676	685
Brita	1068	1080
Água	155	139
Sílica da casca do arroz	47	43
Relação água/cimento	0,32	0,27
Relação água/materiais cimentícios	0,29	0,25

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016).

4.2 DOSAGEM DA SÍLICA ATIVA EM SUSPENSÃO

Foram realizados alguns testes para definição da quantidade ideal de sílica ativa em suspensão a ser utilizada na produção dos concretos de alto desempenho.

Inicialmente, pretendia-se utilizar apenas a sílica ativa em suspensão como material pozolânico complementar ao cimento Portland, substituindo a sílica da casca de arroz presente no traço inicial. No entanto, observou-se que a sílica ativa em suspensão, quando utilizada sozinha, faz com que o concreto apresente uma grande tendência à exsudação. Porém, a combinação de sílica ativa em suspensão e sílica da casca do arroz eliminou este problema.

O manual técnico disponibilizado pelo fabricante recomenda a utilização de dosagens entre 2% a 20% de sílica ativa em suspensão, com relação à massa de cimento. Os teores analisados foram: 15% e 10%, em relação à massa de cimento Portland.

O concreto realizado com 15% de sílica ativa em suspensão e 10% de sílica de casca de arroz apresentou resultados satisfatórios ($56,66 \pm 1,17$ MPa) aos 28 dias, com a mistura 1 e o aditivo A. Apesar disso, a dosagem muito elevada de sílica ativa em suspensão induziu a formação de aglomerados de material na betoneira, dificultando a homogeneização do concreto.

A mesma mistura foi repetida sem a sílica ativa em suspensão, somente com 10% de sílica de casca de arroz, para verificar se o produto realmente apresentaria bons resultados nas propriedades mecânicas do concreto. A resistência à compressão obtida aos 28 dias foi de $40,21 \pm 6,35$ MPa, inferior à mistura com sílica ativa em suspensão. Isso indica que, em dosagens adequadas, a sílica ativa em

suspensão proporciona benefícios ao concreto de alto desempenho, elevando sua resistência à compressão.

Por fim, foi realizada uma mistura com 10% de sílica ativa em suspensão e 8,5% de sílica de casca de arroz. Nesta dosagem, o produto se dispersou mais facilmente na betoneira. Além disso, as resistências à compressão obtidas aos 7 dias e 28 dias, respectivamente foram $57,17 \pm 7,39$ MPa e $63,06 \pm 5,47$ MPa (mistura 2 e aditivo B), comprovando que a dosagem de 10% é mais adequada.

Desta forma, a mistura final selecionada contém 10% de sílica ativa em suspensão e 8,5% de sílica de casca de arroz, com relação à massa de cimento Portland.

4.3 ESCOLHA DO ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Para a realização das misturas de concreto de alto desempenho foram realizados estudos preliminares com dois tipos de aditivos superplastificantes: o aditivo A, composto de polímeros de policarboxilatos e o aditivo B, com composição à base de éter policarboxilatos.

A dosagem recomendada pelo fabricante do aditivo A é de 0,2% a 5%, porém, quantidades acima de 0,4% não tem um desempenho adequado na produção de concretos. Desta forma, foi selecionada a quantidade “limite” de 0,4% em relação à massa de cimento para realização dos testes iniciais.

Para o aditivo B, as quantidades recomendadas variam entre 0,2% e 1,2%, com relação à massa de cimento. O produto se dispersa facilmente no concreto, mesmo em quantidades mais elevadas. Foram avaliados os teores de 1,0% e 1,2%, porém, a quantidade de 1,0% mostrou-se mais adequada para o adensamento do concreto.

Nas primeiras misturas realizadas, o aditivo foi adicionado junto com a fração final de água, após a colocação da areia. Porém, como a quantidade total de água utilizada nos concretos é muito pequena, nesta etapa ainda existiam materiais secos, sem estarem hidratados, fazendo com que o aditivo aglutinasse com o pó presente, perdendo parte do seu desempenho. Entretanto, ao adicionar o aditivo no final do processo, somente após a colocação de toda a água, com todos os materiais hidratados, o concreto ficou mais homogêneo, facilitando a ação do aditivo.

Comparando os dois aditivos utilizados, o produto A apresentou problemas na etapa de mistura do concreto. O produto ficava bastante aderido às paredes do equipamento e não se dispersava na mistura, formando aglomerados em torno da brita. Além disso, estes concretos apresentaram baixa trabalhabilidade, ocasionando um abatimento de tronco de cone baixo (entre 0 cm e 7 cm, conforme o traço analisado). Isso dificultava o adensamento dos corpos de prova na mesa vibratória e provocava o surgimento de enormes vazios, reduzindo a resistência à compressão do concreto. Outro problema verificado com o uso do aditivo A foi o tempo de pega muito curto. O concreto iniciava o processo de endurecimento muito rápido, dificultando mais ainda o adensamento dos corpos de prova finais.

Em contrapartida, o aditivo B apresentou-se apropriado para a produção de concretos de alto desempenho. O produto possibilitou uma boa redução da quantidade de água do concreto, sem prejudicar a trabalhabilidade das misturas. Inicialmente, o abatimento de tronco de cone dos concretos produzidos com o aditivo B também era baixo (entre 2 cm e 5 cm, conforme o traço analisado). Porém, logo após a medição desta propriedade no estado fresco, rapidamente o cone de concreto se desfazia, devido ao efeito do aditivo, aumentando o abatimento para valores entre 17 cm e 20 cm, permitindo um melhor adensamento, comparado ao aditivo A. Após a remoção dos moldes e a ruptura dos corpos de prova no ensaio de resistência à compressão, era possível observar que os corpos de prova produzidos com o aditivo B estavam bem homogêneos, tanto internamente como externamente. Isso também auxiliou no aumento da resistência à compressão, chegando a $65,32 \pm 6,34$ MPa, aos 7 dias, na mistura final.

Desta forma, o aditivo B, com composição à base de éter policarboxilatos, foi selecionado para a continuação da pesquisa, na dosagem de 1,0% com relação à massa de cimento.

4.4 DEFINIÇÃO DO MÉTODO DE SECAGEM DA AREIA

A areia utilizada para a produção dos concretos de alto desempenho foi previamente lavada, para a remoção do material pulverulento, e posteriormente secada. Inicialmente, a secagem do material foi realizada em temperatura ambiente. Porém, como a quantidade de material utilizada era muito grande, o procedimento

demandava muito espaço coberto. Além disso, a umidade do ar elevada na cidade de Joinville tornava a secagem natural muito lenta, inviabilizando o procedimento.

Diante disso, optou-se pela secagem de toda a areia em uma estufa, com temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, para remoção completa da água aderida aos grãos. Além de agilizar o processo, foi possível padronizar a quantidade de água utilizada na produção destes concretos e eliminar possíveis variações no teor de umidade do agregado miúdo, resultando em melhorias também para o concreto.

4.5 SELEÇÃO DA BRITA

A seleção do agregado graúdo para concretos de alto desempenho requer um cuidado especial, visto que ao aumentar a resistência dos concretos, a fase agregado começa a se tornar a parte mais frágil da mistura, muitas vezes limitando a resistência final do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Neste estudo, foram realizados ensaios com britas de duas mineralogias diferentes: de gnaiss e de basalto. A brita de gnaiss possui diâmetro máximo igual a 9,5 mm, inferior ao de basalto, 12,5 mm.

Para comparar o desempenho das britas, foram desenvolvidas duas misturas de concreto. A Tabela 18 apresenta as quantidades dos materiais utilizados e os resultados da resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias.

Tabela 18 - Comparação entre os concretos produzidos com gnaiss e basalto.

Componente (kg/m ³)	Gnaiss	Basalto
Cimento Portland (CPV ARI RS)	513	513
Areia média	-	77 ¹
Areia grossa	685	583 ¹
Brita de gnaiss	1080	-
Brita de basalto	-	1080
Água	113	136 ²
Sílica da casca do arroz	43	43
Sílica ativa em suspensão	51	51
Aditivo superplastificante	5	5
Resistência à compressão - 7 dias	57,17 \pm 7,39 MPa	50,06 \pm 2,97 MPa
Resistência à compressão - 28 dias	63,06 \pm 5,47 MPa	62,64 \pm 2,12 MPa

¹ Areia seca em estufa.

² Como a areia do traço realizado com a brita de basalto foi seca em estufa, enquanto que a da mistura com gnaiss foi seca ao ar, houve a necessidade de acrescentar uma pequena quantidade de água ao concreto.

Fonte: A autora (2019).

Observa-se que aos 7 dias, a resistência obtida com a brita de gnaiss foi superior. Entretanto, aos 28 dias, os valores foram bem semelhantes. Um teste t foi realizado para verificar se os resultados de resistência à compressão aos 28 dias com as duas britas poderiam ser considerados estatisticamente diferentes. As amostras foram consideradas independentes. O resultado do teste comprovou que, após 28 dias, as britas não influenciaram na resistência à compressão dos concretos produzidos ($p\text{-valor}=0,89$).

Apesar disso, deve-se observar que o desvio padrão da mistura de basalto foi consideravelmente baixo, indicando uma maior homogeneidade nos corpos de prova, tornando os resultados mais confiáveis. Já com a brita de gnaiss, o desvio padrão foi mais elevado, indicando uma amostra bastante heterogênea.

Nota-se também que a quantidade de água utilizada no traço da brita de basalto foi ligeiramente superior devido ao fato de que a areia deste concreto foi seca em estufa, removendo completamente a água do agregado, enquanto que a areia do concreto contendo gnaiss foi seca ao ar. Isso indica que a resistência do basalto poderia ser ainda maior caso a quantidade de água dos dois traços fosse mantida constante.

Além da resistência à compressão destes concretos, outro parâmetro utilizado para selecionar a brita foi o ensaio de abrasão Los Angeles. O resultado do ensaio indicou que a brita de basalto apresenta uma resistência ao desgaste superior à brita de gnaiss. A abrasão Los Angeles do basalto foi de 13,56%, enquanto que a do gnaiss foi 17,08%.

4.6 ESCOLHA DA MELHOR MISTURA PARA O CAD

O traço desenvolvido com a brita de basalto, descrito na Tabela 18, foi selecionado para realização dos ajustes finais. Observa-se que o consumo de cimento por metro cúbico de concreto desta mistura era igual a 513 kg/m³. Buscando aumentar ainda mais a resistência à compressão dos concretos, optou-se por aumentar o consumo de cimento para 560 kg/m³, mantendo a água e os demais materiais constantes.

Dentre todas as misturas estudadas, esta foi a que apresentou os melhores resultados. Desta forma, este foi o traço selecionado para confecção dos concretos

de alto desempenho. A Tabela 19 apresenta a quantidade de materiais da mistura final selecionada.

Tabela 19 - Mistura final selecionada para confecção dos concretos de alto desempenho.

Componentes do CAD	Quantidade
Cimento Portland (CPV ARI RS)	560 kg/m ³
Areia média	103 kg/m ³
Areia grossa	582 kg/m ³
Brita de basalto	1080 kg/m ³
Água	136 kg/m ³
Sílica da casca do arroz	43 kg/m ³
Sílica ativa em suspensão ¹	56 kg/m ³
Aditivo superplastificante	5,6 kg/m ³
Relação água/cimento ²	0,29
Relação água/materiais cimentícios ^{2, 3}	0,26

¹ Composição: 50% de sílica ativa e 50% de água

² O cálculo da relação água/cimento e relação água/materiais cimentícios incluiu a quantidade de água presente na sílica ativa em suspensão.

³ Materiais cimentícios: cimento Portland, sílica da casca do arroz e a fração da sílica ativa em suspensão correspondente à sílica ativa.

Fonte: A autora (2019).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE 2

A fase 2 refere-se aos resultados gerais da pesquisa. São apresentados os resultados de abatimento de tronco de cone, calor de hidratação, absorção de água, índice de vazios, massa específica, resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral em temperatura ambiente, condutividade térmica e resistividade elétrica das misturas analisadas.

5.1 ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE

A Tabela 20 apresenta os resultados do abatimento de tronco de cone das cinco misturas estudadas.

Tabela 20 - Resultados do abatimento de tronco de cone das misturas analisadas.

Mistura analisada	Abatimento de tronco de cone	Classificação segundo a NBR 8953 (ABNT, 2015)
CC	10 cm	S100
CAD	5 cm	S10
CAD.1	5 cm	S10
CAD.2	3 cm	S10
CAD.3	2 cm	S10

Fonte: A autora (2019).

É possível visualizar que o concreto convencional apresentou um abatimento bem superior às demais misturas, enquadrando-o na classe S100 da NBR 8953 (ABNT, 2015), para abatimentos entre 10 e 16 cm. Este aumento na trabalhabilidade está associado à maior quantidade de água utilizada neste traço.

As misturas de concreto de alto desempenho, com ou sem fibras, foram todas classificadas na classe S10, com abatimentos entre 1 e 5 cm. Observa-se que a redução da quantidade de água prejudicou consideravelmente a trabalhabilidade inicial da mistura. No entanto, quando as misturas eram submetidas a um processo de vibração, na mesa vibratória, o material adquiria uma condição adequada para adensamento, sem prejudicar a integridade dos corpos de prova.

Além disso, verificou-se durante a produção dos concretos de alto desempenho que a ação do aditivo superplastificante fazia com que o cone de concreto produzido neste ensaio rapidamente desmoronasse, aumentando o abatimento para valores próximos a 20 cm em um curto período de tempo. O aditivo

utilizado também garantiu uma boa coesão da mistura, mesmo com uma pequena quantidade de água de amassamento.

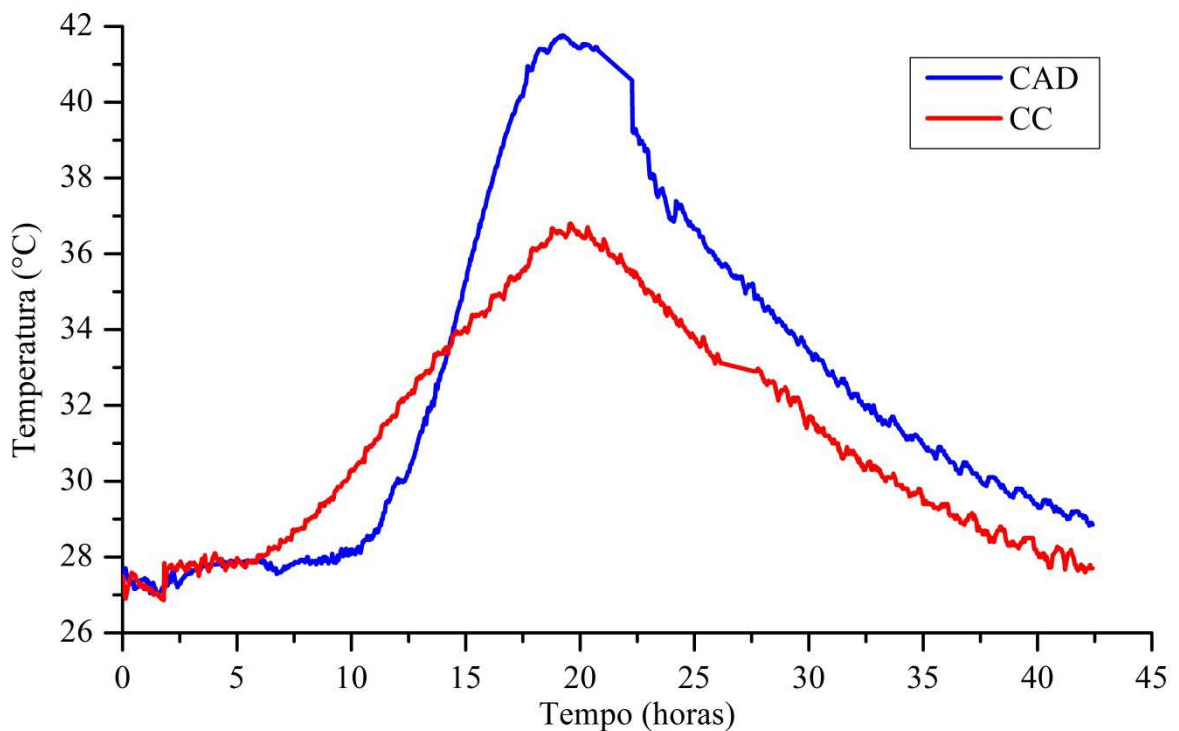
Comparando o abatimento dos concretos com fibras, o teor de 1 kg/m³ não modificou a trabalhabilidade da mistura. Entretanto, ao elevar a quantidade para 2 kg/m³ e 3 kg/m³, o abatimento reduziu 40% e 60%, respectivamente. Isso mostra que o aumento da quantidade de microfibras de polipropileno prejudica a trabalhabilidade do concreto, comprovando os estudos de Arunachalam e Jayakumar (2015), Alsadey e Salem (2016) e Abaeian, Behbahani e Moslem (2018).

Apesar disso, deve-se acrescentar que independente dos teores adicionados, as microfibras em estudo se dispersaram facilmente, sem apresentar problemas de aglomeração, deixando o concreto com um aspecto bastante homogêneo.

5.2 CALOR DE HIDRATAÇÃO

A Figura 29 apresenta a variação da temperatura dos concretos CC e CAD ao longo do tempo durante o processo de cura.

Figura 29 - Calor de hidratação gerado pelo CC e CAD.



Fonte: A autora (2019).

Observa-se que os dois concretos atingiram o pico de temperatura praticamente ao mesmo tempo, decorrido um período de aproximadamente 20 horas. No entanto, a temperatura máxima atingida pelo CC (36,82°C) é consideravelmente menor do que a temperatura máxima do CAD (41,77°C), com uma diferença 11,85% inferior. Nota-se ainda que a taxa de elevação da temperatura do CAD é bem mais elevada do que do concreto convencional, visto que a curva do CAD é mais acentuada.

Com relação à temperatura inicial das misturas, o CC e o CAD apresentaram um aumento de 9,32°C e 14,12°C, para volumes de aproximadamente 350 ml de concreto.

O consumo elevado de cimento do CAD possivelmente contribuiu para uma elevação considerável da temperatura durante a cura do material. O uso de cimento CP V-ARI, por ser mais fino que o cimento CP II-Z 32 utilizado no CC, também pode estar associado com a aceleração da reação de hidratação, proporcionando maior área disponível para contato entre o cimento e a água, conforme apresentado por Riding *et al.* (2012).

Analisando apenas o calor de hidratação, a utilização de sílica ativa pode não ser a alternativa mais eficaz para a redução da temperatura máxima (BOURCHY *et al.* 2019). Adições minerais como a cinza volante costumam ser mais efetivas para minimizar o calor total gerado na hidratação do cimento (IGNJATOVÍČ *et al.*, 2017).

Para aplicações que envolvam grandes volumes de concreto, quantidades excessivas de calor de hidratação podem causar tensões e patologias indesejáveis na estrutura. Nesses casos, é necessário avaliar a adoção de estratégias para minimizar a quantidade total de calor gerado pelo CAD, como por exemplo, a refrigeração prévia da água e dos agregados, substituição da água por gelo, entre outras alternativas, tomando sempre os cuidados para garantir uma cura adequada do material (BOFANG, 2014).

5.3 MASSA ESPECÍFICA, ABSORÇÃO DE ÁGUA E ÍNDICE DE VAZIOS

Os resultados das propriedades físicas de absorção de água, índice de vazios e massa específica estão indicados na Tabela 21.

Tabela 21 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Concretos	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm ³)
CC	4,63 ± 0,19	10,65 ± 0,46	2,30 ± 0,01
CAD	1,62 ± 0,26	4,03 ± 0,60	2,49 ± 0,04
CAD.1	1,64 ± 0,02	4,05 ± 0,04	2,46 ± 0,01
CAD.2	1,72 ± 0,14	4,27 ± 0,36	2,48 ± 0,02
CAD.3	1,75 ± 0,02	4,34 ± 0,04	2,48 ± 0,01

Fonte: A autora (2019).

Os resultados da absorção de água do CAD são consideravelmente baixos, 65,01% inferiores ao do CC. Além disso, a adição de fibras praticamente não influenciou na absorção de água, resultando em aumentos de 1,23%, 6,17% e 8,02% com a adição de 1, 2 e 3 kg/m³ de fibras.

Isso contribui consideravelmente para um aumento da durabilidade dos concretos, pois dificulta a penetração de água e agentes agressivos, que diminuem a vida útil de um material.

O índice de vazios do CAD foi 62,16% inferior ao do CC. A baixa relação água/cimento contribui para a redução da porosidade e índice de vazios da mistura, o que torna a matriz cimentícia bastante densa e pouco porosa.

É importante ressaltar também que as adições minerais, por apresentarem elevada finura, colaboram para o refinamento dos vazios do concreto. Dessa forma, possivelmente a adição da sílica de casca de arroz e sílica ativa em suspensão utilizadas na mistura contribuiu para que a porosidade do CAD fosse consideravelmente reduzida.

A adição de fibras também não resultou em diferenças expressivas no índice de vazios: 0,50%, 5,96% e 7,69%, conforme o aumento na dosagem. Isso indica que as misturas foram adequadamente adensadas, minimizando o surgimento de possíveis vazios associados à sua utilização. O índice de vazios e a porosidade são parâmetros que tem uma relação direta com a resistência à compressão das misturas, visto que na maioria dos casos, a dificuldade de adensamento e a consequente introdução de vazios no concreto, são problemas relacionados com a redução da resistência à compressão de concretos reforçados com fibras.

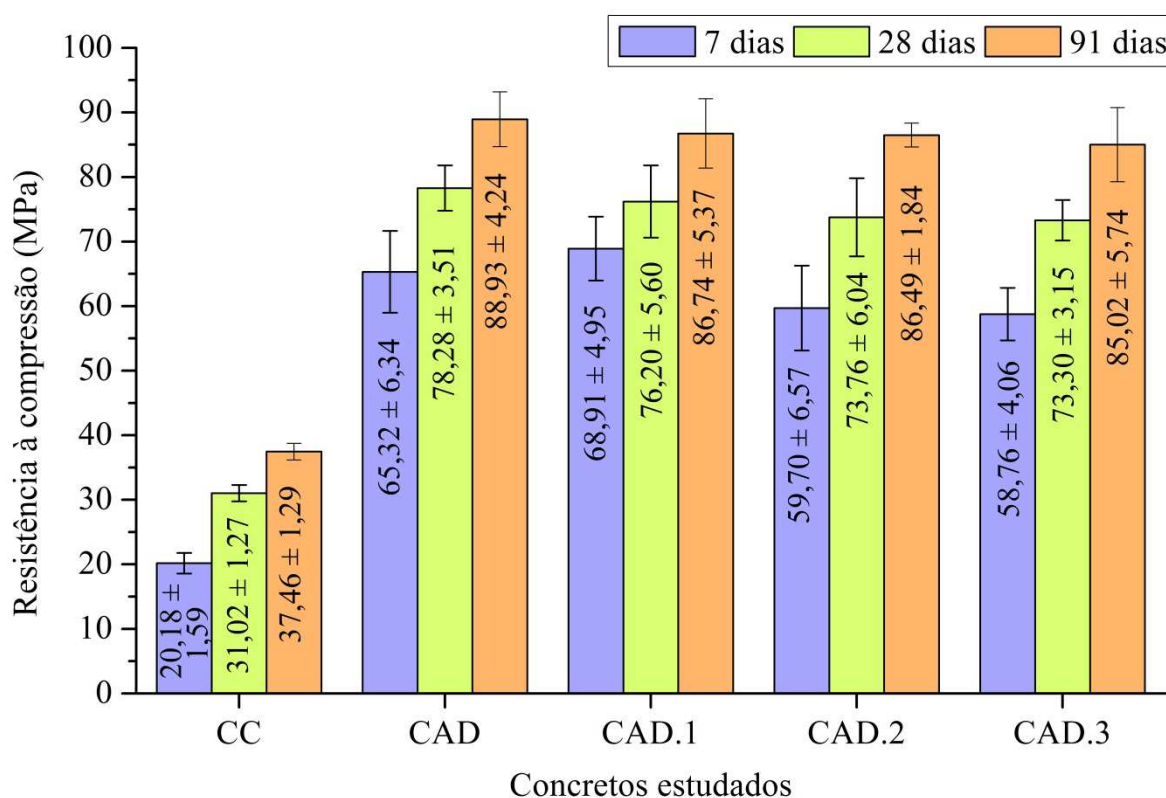
Com relação à massa específica, todos os concretos foram classificados na categoria normal, para valores entre 2000 e 2800 kg/m³, conforme a NBR 8953 (ABNT, 2015).

O CAD apresentou uma massa específica 8,26% superior ao CC. A adição de fibras não influenciou na massa específica do material, resultando em diferenças inferiores a 2%. As fibras de polipropileno têm a vantagem de serem extremamente leves e apresentarem diâmetro consideravelmente pequeno, o que não interfere na massa específica do concreto.

5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A Figura 30 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias e os respectivos desvios padrão dos concretos estudados.

Figura 30 - Resultados da resistência à compressão em temperatura ambiente.



Fonte: A autora (2019).

É possível observar que o concreto convencional apresenta uma resistência à compressão bem inferior aos valores dos concretos de alto desempenho, em todas as idades. Isso indica que a redução da relação água/materiais cimentícios, bem como a utilização de aditivos superplastificantes e adições minerais, permitiu um aumento considerável na resistência à compressão dos concretos de alto

desempenho. Comparando a mistura CC com o CAD, a diferença entre os resultados é de 69,11%, 60,37% e 57,88%, aos 7, 28 e 91 dias, respectivamente.

Mesmo com idades baixas, aos 7 dias, todas as misturas de concreto de alto desempenho podem ser classificadas no Grupo II da NBR 8953 (ABNT, 2015), que inclui resistências entre 55 e 100 MPa.

A variação da resistência à compressão dos concretos com diferentes teores de fibras não foram expressivas. Adotando como referência o CAD, as maiores diferenças observadas foram aos 7 dias: +5,04%, -8,60% e -10,04%, ao adicionar 1, 2 e 3 kg/m³ de fibras de polipropileno, respectivamente. Com 28 dias, as diferenças caíram para -2,65%, -5,77% e -6,36%. Aos 91 dias, as diferenças foram praticamente desprezíveis: -2,46%, -2,74% e -4,39%.

Para confirmar se as fibras realmente não influenciam estatisticamente na resistência à compressão dos concretos de alto desempenho, foi desenvolvida uma análise de variância, conforme mostra a Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da ANOVA da resistência à compressão.

Variável / Idade	Graus de liberdade			Soma dos quadrados			Estatística F			Valor p		
	7 d	28 d	91 d	7 d	28 d	91 d	7 d	28 d	91 d	7 d	28 d	91 d
Fibras	3	3	3	234,5	52,1	23,4	2,54	0,82	0,38	0,12	0,51	0,77
Resíduos	10	9	9	308,3	190,1	166,3	-	-	-	-	-	-
Total	13	12	12	542,8	242,2	189,7	-	-	-	-	-	-

Fonte: A autora (2019).

Na análise apresentada, pode-se concluir que os teores de fibra não influenciaram na resistência à compressão em nenhuma das idades (valor $p > \alpha$, sendo $\alpha = 0,05$). Isso indica que as diferenças obtidas entre as médias dos diferentes teores de fibra não são estatisticamente significativas, confirmando os estudos de Cao *et al.* (2017), Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) e Eidan *et al.* (2019).

Os resultados de resistência à compressão aos 7 e 91 dias, obtidos experimentalmente, foram comparados com os valores previstos pela Equação (1), proposta pelo Eurocode 2, que relaciona a resistência à compressão aos 28 dias com a resistência após t dias de cura. A Tabela 23 apresenta esta análise.

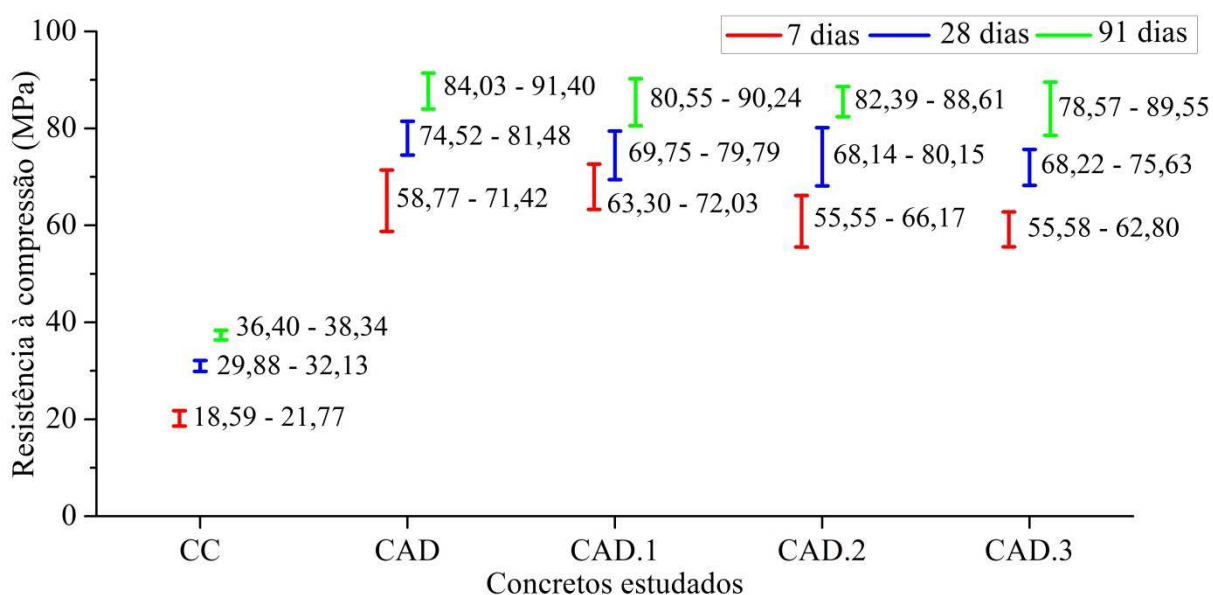
Tabela 23 - Previsão de resultados da resistência à compressão com base no Eurocode 2.

Concretos	7 dias			91 dias		
	Valor esperado pelo Eurocode 2 (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)	Valor esperado pelo Eurocode 2 (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)
CC	24,16	20,18	-16,47%	38,33	37,46	-2,26%
CAD	64,09	65,32	1,92%	92,71	88,93	-4,08%
CAD.1	62,39	68,91	10,46%	90,25	86,78	-3,89%
CAD.2	60,39	59,70	-1,14%	87,36	86,49	-1,00%
CAD.3	60,01	58,76	-2,09%	86,82	85,02	-2,07%

Fonte: A autora (2019).

Os valores experimentais e teóricos são muito próximos, validando a equação para as idades de 7 e 91 dias, em concretos convencionais e de alto desempenho. É possível analisar ainda que a Equação (1) relaciona apenas o parâmetro de cimento Portland, sem considerar as adições minerais utilizadas nos concretos de alto desempenho. Mesmo assim, as diferenças obtidas foram satisfatórias. Isso indica que a sílica ativa utilizada não teve uma influência tão marcante na evolução da resistência à compressão dos concretos de alto desempenho ao longo dos 91 dias de cura, sendo o cimento Portland CP V-ARI o principal responsável por essa evolução.

Os intervalos de confiança de 95% para a média de todos os concretos produzidos estão indicados na Figura 31.

Figura 31 - Intervalos de confiança *Bootstrap* de 95% para a resistência à compressão.

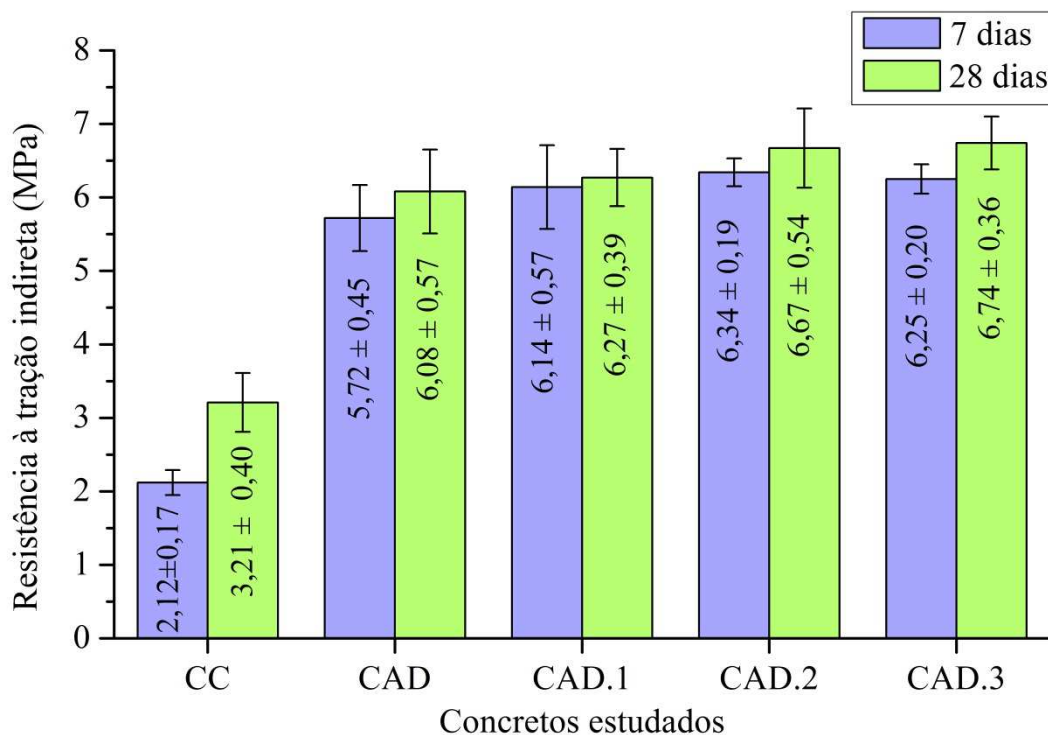
Fonte: A autora (2019).

Os intervalos de confiança relacionados à mesma idade dos concretos de alto desempenho se interceptam, confirmando que as fibras não influenciam na resistência à compressão destas misturas.

5.5 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O gráfico com os resultados da resistência à tração por compressão diametral aos 7 e 28 dias está indicado na Figura 32.

Figura 32 - Resultados da resistência à tração por compressão diametral em temperatura ambiente.



Fonte: A autora (2019).

A resistência à tração por compressão diametral obtida para o CC foi 62,94% e 47,20% inferior à resistência do CAD, nas idades de 7 e 28 dias. Isso comprova que além de melhorar consideravelmente a resistência à compressão, a utilização de materiais especiais, em dosagens adequadas, permite também um aumento considerável na resistência à tração do concreto.

Observa-se que a utilização das microfibras de polipropileno contribuiu para um aumento numérico da resistência à tração dos concretos de alto desempenho. Quanto maior o teor de fibras adicionado, mais efetivo foi esse crescimento.

Na idade de 7 dias, houve um aumento de 7,34%, 10,84% e 9,27%, com os teores de 1, 2 e 3 kg/m³ de fibras, respectivamente. Aos 28 dias, os acréscimos na resistência à tração foram de 3,13%, 9,70% e 10,86%. Resultados semelhantes foram encontrados por Afroughsabet e Ozbakkaloglu (2015).

Este aumento foi explicado pelo fato de que as fibras formam uma ponte de ligação entre os agregados e a matriz cimentícia, elevando o valor da resistência à tração. Apesar disso, como a resistência e o módulo de elasticidade das microfibras de polipropileno são relativamente baixos, os resultados obtidos não foram tão expressivos.

De um ponto de vista estatístico, a análise de variância indicou que esse aumento na resistência à tração não é significativo (valor $p > \alpha$, sendo $\alpha = 0,05$), conforme mostra a Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados da ANOVA da resistência à tração por compressão diametral.

Variável / Idade	Graus de liberdade		Soma dos quadrados		Estatística F		Valor p	
	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d
Fibras	3	3	0,6832	0,3462	1,52	1,73	0,282	0,230
Resíduos	8	9	1,1985	0,2002	-	-	-	-
Total	11	12	1,8817	0,5464	-	-	-	-

Fonte: A autora (2019).

A Tabela 25 apresenta os resultados referentes à previsão da resistência à tração indireta por diversos modelos de regressão previamente apresentados.

Nota-se que alguns modelos não foram adequados para prever a resistência à tração indireta dos concretos estudados, especialmente dos concretos de alto desempenho, onde as diferenças foram bem consideráveis.

Para o CC, o modelo que mais se aproximou dos resultados experimentais foi proposto pelo ACI 318R-11 (2011). Para o CAD, o modelo de Artoglu N., Girgin e Artoglu E. (2006) foi o mais representativo.

Para os concretos com fibras, nenhum modelo apresentou resultados satisfatórios. Isso se deve ao fato de que as fibras influenciam diretamente nos valores da resistência à tração. Sendo assim, modelos de previsão convencionais, que não consideram a presença e o teor de fibras utilizado, tendem a subestimar os resultados desta propriedade.

Tabela 25 - Previsão da resistência à tração indireta por diversos modelos de regressão.

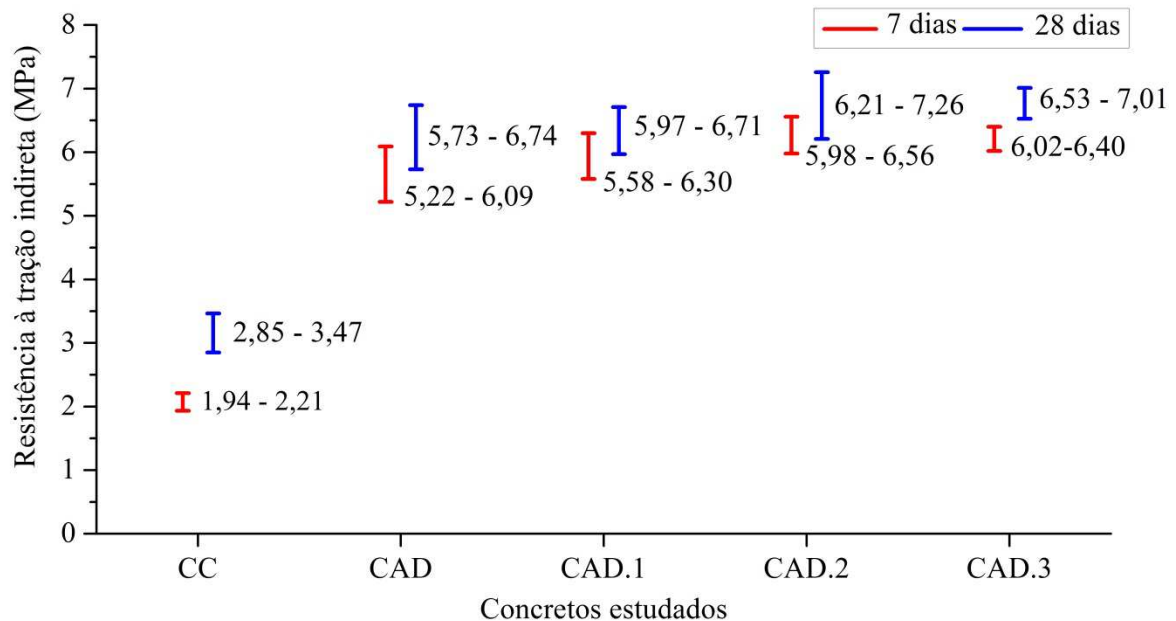
Referência	Concretos	7 dias			28 dias		
		Valor esperado (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)	Valor esperado (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)
ACI 363R-10 (2010)	CC	2,65	2,12	-20,01%	3,29	3,21	-2,31%
	CAD	4,77	5,72	+19,96%	5,22	6,08	+16,47%
	CAD.1	4,90	6,14	+25,36%	5,15	6,27	+21,74%
	CAD.2	4,56	6,34	+39,08%	5,07	6,67	+31,63%
	CAD.3	4,52	6,25	+38,19%	5,05	6,74	+33,43%
ACI 318R-11 (2011)	CC	2,52	2,12	-15,87%	3,12	3,21	+2,92%
	CAD	4,53	5,72	+26,27%	4,95	6,08	+22,71%
	CAD.1	4,65	6,14	+32,04%	4,89	6,27	+28,26%
	CAD.2	4,33	6,34	+46,42%	4,81	6,67	+38,68%
	CAD.3	4,79	6,25	+30,48%	4,79	6,74	+40,58%
CEB-FIP (1991)	CC	2,22	2,12	-4,66%	2,96	3,21	+8,38%
	CAD	4,87	5,72	+17,56%	5,49	6,08	+10,75%
	CAD.1	5,04	6,14	+21,77%	5,39	6,27	+16,28%
	CAD.2	4,58	6,34	+38,35%	5,28	6,67	+26,41%
	CAD.3	4,53	6,25	+37,84%	5,25	6,74	+28,27%
Artoglu (1999)	CC	2,34	2,12	-9,37%	3,11	3,21	+3,28%
	CAD	5,08	5,72	+12,50%	5,73	6,08	+6,10%
	CAD.1	5,27	6,14	+16,56%	5,63	6,27	+11,38%
	CAD.2	4,79	6,34	+32,33%	5,51	6,67	+21,06%
	CAD.3	4,74	6,25	+31,83%	5,49	6,74	+22,83%
Moktarzadeh e French (2000)	CC	2,12	2,12	-0,21%	2,79	3,21	+15,24%
	CAD	4,45	5,72	+28,46%	4,99	6,08	+21,83%
	CAD.1	4,61	6,14	+33,32%	4,91	6,27	+27,79%
	CAD.2	4,21	6,34	+50,69%	4,81	6,67	+38,76%
	CAD.3	4,17	6,25	+50,04%	4,79	6,74	+40,76%
Artoglu, Girgin e Artoglu (2006)	CC	2,57	2,12	-17,49%	3,37	3,21	-4,71%%
	CAD	5,39	5,72	+6,22%	6,04	6,08	+0,74%
	CAD.1	5,57	6,14	+10,24%	5,93	6,27	+5,66%
	CAD.2	5,09	6,34	+24,60%	5,81	6,67	+14,73%
	CAD.3	5,04	6,25	+24,06%	5,79	6,74	+16,39%
Jaber; Gorgis e Hassan (2018) ¹	CC	2,92	2,12	-27,40%	3,62	3,21	-11,33%
	CAD	-	5,72	-	-	6,08	-
	CAD.1	-	6,14	-	-	6,27	-
	CAD.2	5,02	6,34	+26,24%	-	6,67	-
	CAD.3	4,98	6,25	+25,44%	-	6,74	-

¹ Modelo de regressão válido apenas para $f_c < 62$ MPa.

Fonte: A autora (2019).

A Figura 33 apresenta os intervalos de confiança de 95% para a média de todos os concretos produzidos. Novamente os intervalos de confiança relacionados à mesma idade dos concretos de alto desempenho se interceptaram, confirmando que as fibras não influenciam na resistência à tração das misturas.

Figura 33 - Intervalos de confiança *Bootstrap* de 95% para a resistência à tração indireta.



Fonte: A autora (2019).

5.6 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Os resultados da condutividade térmica dos concretos são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados da condutividade térmica dos concretos.

Concretos	Condutividade térmica (W/m.K)
CC	1,62
CAD	2,23
CAD.1	2,14
CAD.2	2,15
CAD.3	2,14

Fonte: A autora (2019).

De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), a condutividade térmica de concretos com massa específica entre 2200 e 2400 kg/m³, como é o caso do CC, pode ser considerada igual a 1,75 W/m.K. O valor encontrado experimentalmente para esta mistura (1,62 W/m.K) é muito próximo ao valor de referência da norma, com uma diferença de apenas 7,43%.

Comparando este valor com a referência indicada pela NBR 15200 (ABNT, 2012a), igual a 1,3 W/m.K, a diferença é bem mais expressiva, 24,62% superior. Isso indica que a massa específica tem uma influência considerável na

condutividade térmica dos concretos, sendo, portanto, inadequado estabelecer apenas um único valor para esta propriedade.

Analisando os resultados dos concretos de alto desempenho com o CC, observa-se um aumento considerável de 37,65% na condutividade do CAD sem fibras. Isso se deve ao fato de que a porosidade do CC é bem superior à do CAD. Considerando que a condutividade do ar é bem inferior à do concreto, o aumento no índice de vazios faz com que a condutividade térmica do material seja menor (ASADI *et al.*, 2018; REAL *et al.*, 2016).

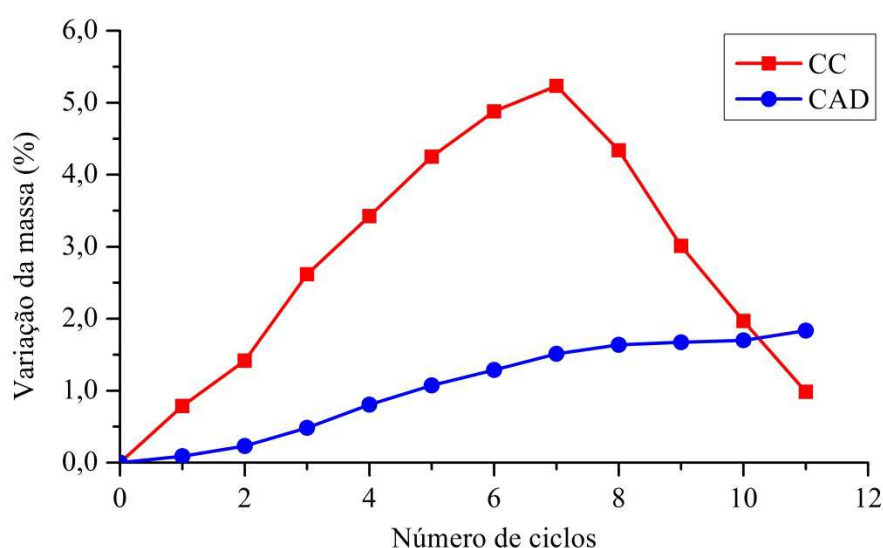
Não foram identificadas diferenças consideráveis entre os concretos de alto desempenho com ou sem fibras, mesmo para teores elevados de polipropileno. Os mesmo resultados também foram obtidos por Gül *et al.* (2007) e Khaliq e Kodur (2011).

As microfibras de polipropileno apresentam diâmetro e volume bem pequenos, interferindo pouco na porosidade dos concretos e consequentemente na condutividade térmica dos compósitos.

5.7 DURABILIDADE E RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A durabilidade do concreto convencional e do concreto de alto desempenho sem fibras foi verificada por meio de ciclos de molhagem e secagem em uma solução contendo 10% de sulfato de sódio. A Figura 34 apresenta a variação percentual da massa dos corpos de prova analisados.

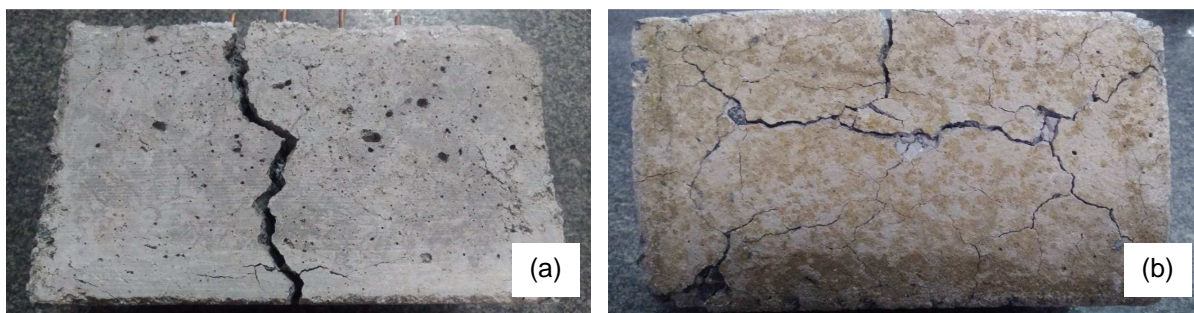
Figura 34 - Variação de massa dos concretos após ataque por sulfato.



Fonte: A autora (2019).

Nos primeiros sete ciclos, o CC apresentou um ganho de massa bem superior ao CAD, associado à absorção do sulfato nos ciclos de molhagem e secagem. Após este período, o concreto passou por uma perda progressiva de material. Ao final de 11 ciclos (11 semanas), o concreto convencional ficou bastante danificado, com a presença de fissuras com aberturas superiores a 5 mm e manchas avermelhadas na face inferior (Figura 35).

Figura 35 - Concreto convencional após ataque por sulfato: (a) Face lateral; (b) Face inferior.



Fonte: A autora (2019).

Segundo Steindl *et al.* (2019), os produtos da reação do sulfato com a matriz cimentícia são expansivos, induzindo o surgimento de fissuras e a degradação das camadas externas do concreto.

A norma brasileira de concreto armado - NBR 6118 (ABNT, 2014) não permite a utilização de concretos com resistência de 25 MPa em ambientes marinhos (classe de agressividade ambiental III) ou locais com possibilidade de contato com respingos de maré (classe de agressividade IV). A exposição do concreto convencional ao sulfato comprovou que o material não é adequado para exposição em ambientes agressivos, degradando-se rapidamente após 11 semanas.

No concreto de alto desempenho, o ganho de massa foi consideravelmente menor. Além disso, após 11 ciclos, o CAD não sofreu perda de massa considerável e não apresentou fissuras ou deslocamento de material (Figura 36). Durante o período analisado, ficou comprovado que a durabilidade do concreto de alto desempenho é superior à do concreto convencional. A utilização de materiais pozolânicos e a adoção de uma relação água/cimento menor contribuíram para tornar a microestrutura do concreto mais densa, dificultando a penetração de água e dos agentes agressivos, melhorando as condições de durabilidade do CAD. A seleção de um cimento resistente ao sulfato (CPV ARI RS) provavelmente também contribuiu para a durabilidade da mistura.

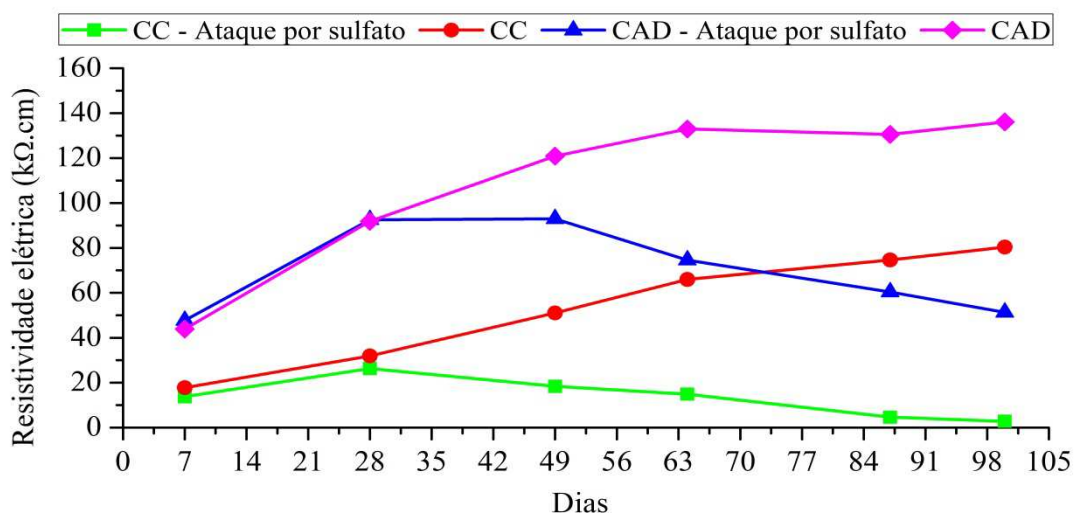
Figura 36 - Concreto de alto desempenho após ataque por sulfato.



Fonte: A autora (2019).

Além da perda de massa, também foi verificado a resistividade elétrica dos concretos submetidos ao ataque por sulfato e de corpos de prova sem ataque químico (Figura 37). As medições tiveram início aos 7 dias de cura.

Figura 37 - Resultados da resistividade elétrica dos concretos.



Fonte: A autora (2019).

Nas amostras sem contato com o sulfato, observa-se um aumento na resistividade elétrica com o decorrer do tempo, tanto para o CC como para o CAD. Isso indica que se os concretos forem mantidos em condições adequadas de exposição, o potencial de corrosão da armadura tende a diminuir cada vez mais, até se estabilizar.

O concreto convencional, sob o critério de análise do CEB (1988) e de Broomfield e Millard (2002), apresenta probabilidade desprezível de corrosão após 28 dias de cura. Já o concreto de alto desempenho, apresenta potencial desprezível em todas as idades analisadas, inclusive aos 7 dias. Analisando o critério do RILEM (2000), os resultados são um pouco mais conservadores. Aos 7 dias e 28 dias, o CC

possui potencial moderado, passando para a categoria de risco baixo somente após 49 dias de cura. Já o CAD apresenta risco desprezível a partir de 28 dias de cura.

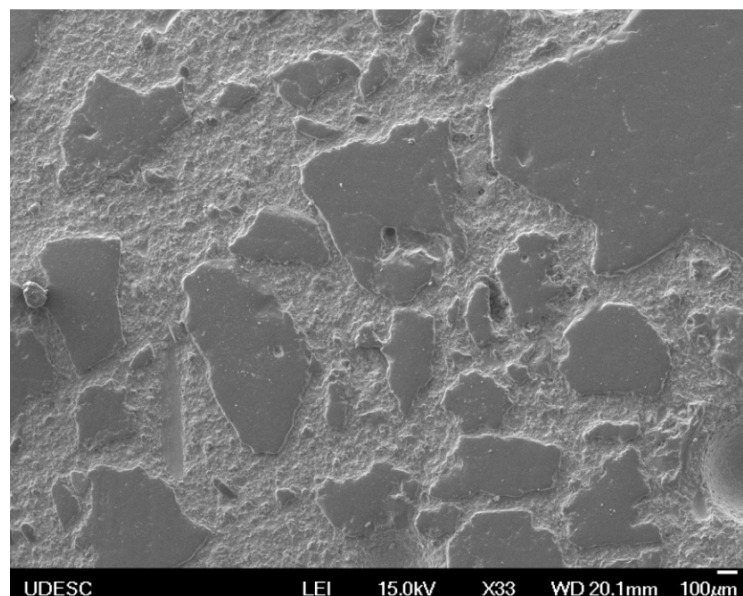
Para os concretos submetidos ao ataque por sulfato, houve uma redução progressiva da resistividade elétrica, indicando um aumento no potencial de corrosão da armadura. O concreto convencional foi o mais afetado. A partir da medição realizada aos 87 dias de cura, simultâneo ao 8º ciclo de molhagem e secagem, o potencial de corrosão do CC foi classificado como alto, de acordo com o RILEM (2000) e Broomfield e Millard (2002) e muito alto, segundo o CEB (1988). Entre o 7º e 8º ciclo, teve início a perda de massa do corpo de prova, coincidindo com o ponto onde houve um aumento no potencial de corrosão.

No caso do CAD, apesar de haver uma redução da resistividade elétrica provocada pelo ataque de sulfato, seu potencial de corrosão ainda foi classificado como baixo/desprezível em todas as idades, conforme os três autores analisados, confirmando os resultados apresentados pela variação de massa e comprovando as condições de durabilidade do concreto de alto desempenho.

5.8 MICROESTRUTURA

A imagem da microestrutura do concreto de alto desempenho, para uma amostra plana, polida e embutida em resina, está indicada na Figura 38, com uma ampliação de 33 vezes.

Figura 38 - Microestrutura do concreto de alto desempenho com ampliação de 33 vezes.



Fonte: A autora (2019).

É possível visualizar a distribuição dos agregados em torno da matriz cimentícia. Os elementos mais escuros da imagem representam os agregados presentes na amostra, com tamanhos bastante irregulares. A matriz cimentícia é caracterizada pela porção mais clara da imagem. Nesta ampliação, não é possível observar a presença de poros.

A interface entre os agregados e a pasta é apresentada na Figura 39, com uma imagem ampliada 4000 vezes.

Figura 39 - Interface pasta-agregado com ampliação de 4000 vezes.



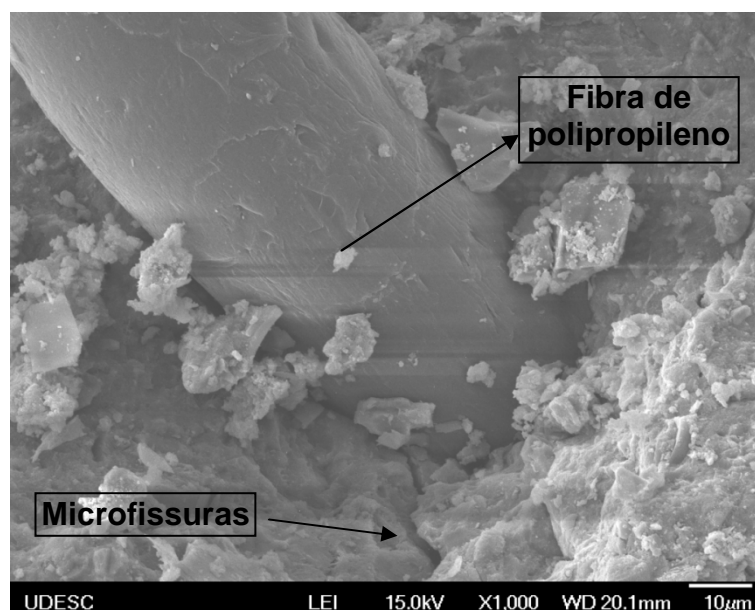
Fonte: A autora (2019).

A adição de materiais pozolânicos como a sílica ativa e a utilização de aditivos superplastificantes, presentes no concreto de alto desempenho, tendem a reduzir a zona de transição pasta-agregado, diminuindo a permeabilidade do concreto e melhorando suas propriedades mecânicas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A utilização de fibras no concreto também induz o surgimento de uma interface matriz-fibra, indicada na Figura 40 com uma ampliação de 1000 vezes de uma amostra não embutida da mistura CAD.2.

Nota-se que a inserção das fibras no concreto provoca o surgimento de pequenas microfissuras concentradas na interface matriz-fibra. Dessa forma, a zona de transição tende a ser mais frágil, um dos fatores responsáveis por reduzir a resistência à compressão dos concretos reforçados com fibras e aumentar a porosidade destas misturas.

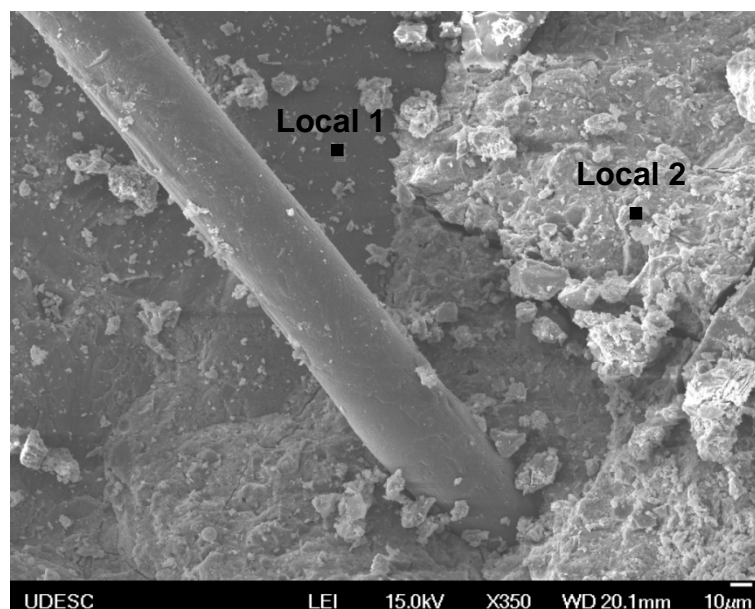
Figura 40 - Interface da fibra com a matriz cimentícia. Ampliação de 1000 vezes.



Fonte: A autora (2019).

A Figura 41 apresenta a micrografia do concreto CAD.2 com ampliação de 350 vezes e identificação dos pontos selecionados para análise semi-quantitativa da composição química por EDS.

Figura 41 - Micrografia do concreto CAD.2 com ampliação de 350 vezes.

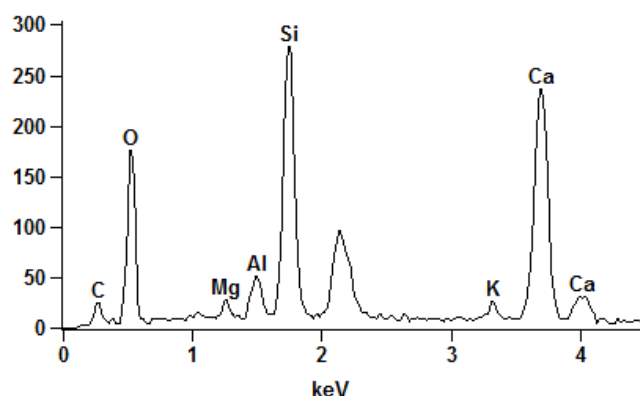


Fonte: A autora (2019).

O espectro EDS (Figura 42) do local 1 revela a presença de cálcio, silício e oxigênio como principais elementos. A Tabela 27 apresenta a composição química

semi-quantitativa. De acordo com os resultados, o local 1 provavelmente é um produto da hidratação do cimento Portland ou da sílica ativa, formado principalmente por C-S-H gel. A fração molar Ca/Si no local 1 é igual a 1,22, próximo a razão molar teórica da fase gel C-S-H, que admite valores teóricos entre 0,8 e 2,5 (ROSSIGNOLO, 2007). A presença do potássio e do alumínio pode estar associada à sílica da casca de arroz ou à sílica ativa em suspensão. O magnésio possivelmente está relacionado com uma pequena quantidade de hidrotalcita, produto da hidratação do cimento Portland que contém magnésio e alumínio em sua composição, originado pela decomposição do hidróxido de magnésio (CINCOTTO, 2011).

Figura 42 - Espectro EDS do local 1.



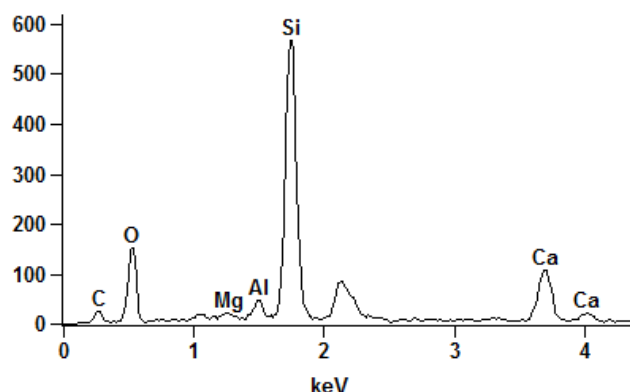
Fonte: A autora (2019).

Tabela 27 - Composição química do local 1.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
C	3,42 ± 0,28
O	42,89 ± 1,34
Mg	0,99 ± 0,15
Al	2,46 ± 0,17
Si	17,71 ± 0,42
K	1,60 ± 0,21
Ca	30,93 ± 0,93

Fonte: A autora (2019).

Para o local 2, o espectro EDS (Figura 43) indica a presença de grandes quantidades de silício. A composição química semi-quantitativa (Tabela 28) indica que o local 2 provavelmente é um agregado de basalto. A razão molar Ca/Si é consideravelmente baixa, 0,31, próxima ao valor teórico de 0,19 da brita de basalto. Segundo Schiavon, Redondo e Yoshida (2007), os agregados de basalto são constituídos de aproximadamente 43 a 47% de SiO₂, 11 a 13% de Al₂O₃, 10 a 12% de CaO e 8 a 10% de MgO, além de óxidos presentes em porcentagens inferiores a 5%. Observa-se que estes mesmos componentes estão presentes na análise do EDS apresentada para o local 2.

Figura 43 - Espectro EDS do local 2.

Fonte: A autora (2019).

Tabela 28 - Composição química do local 2.

Elemento químico	Composição EDS (massa %)
C	$6,57 \pm 0,50$
O	$36,92 \pm 1,21$
Mg	$0,82 \pm 0,15$
Al	$1,97 \pm 0,17$
Si	$37,08 \pm 0,56$
Ca	$16,63 \pm 0,46$

Fonte: A autora (2019).

5.9 DEFINIÇÃO DE UMA POTENCIAL APLICAÇÃO PARA O CAD

O concreto de alto desempenho produzido apresenta como principal vantagem uma elevada resistência à compressão, especialmente em baixas idades, aos 7 dias. No entanto, como ponto negativo, destacam-se os problemas com a trabalhabilidade, decorrente da baixa relação água/materiais cimentícios. O abatimento do concreto é extremamente baixo, 5 cm, entretanto, quando vibrado adequadamente em mesa vibratória, é possível obter um adensamento apropriado, sem prejudicar a integridade dos corpos de prova. Em estudos futuros, sugere-se avaliar a possibilidade de aumentar a quantidade do aditivo no traço, para melhorar a fluidez do concreto e facilitar a sua aplicação.

Com base nestas características obtidas, uma das possíveis aplicações é a utilização em elementos estruturais de concreto pré-moldado, como lajes, vigas e pilares. Neste tipo de estrutura, é essencial que a resistência inicial do concreto seja elevada, garantindo uma desforma rápida e agilizando o processo produtivo. Além disso, nas indústrias de pré-moldado é possível a utilização de concretos com baixo abatimento. O adensamento das peças é realizado com auxílio de vibradores de imersão ou até mesmo mesas vibratórias, que garantem a moldagem correta das peças produzidas.

A produção de estruturas de concreto pré-moldado também envolve um controle rigoroso da produção, lançamento e adensamento do concreto. Além disso, a cura das peças é realizada em condições controladas, garantindo a qualidade do concreto do início ao fim da produção, atendendo as exigências e cuidados dos concretos de alto desempenho.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES - FASE 3

A fase 3 da pesquisa compreende os resultados obtidos pela exposição dos concretos em elevadas temperaturas.

Inicialmente, foram avaliadas as temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C. A primeira mistura analisada foi o CAD.2, sendo que nenhum corpo de prova apresentou lascamento explosivo, permitindo a determinação da resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade.

Os ensaios seguintes foram realizados com o concreto de alto desempenho sem fibras (CAD). Após exposição em 200°C, os corpos de prova permaneceram íntegros, sem perda considerável de material. No entanto, imediatamente após atingir a temperatura de 400°C, o concreto sofreu uma intensa explosão, se desintegrando completamente em pequenos pedaços (Figura 44).

Figura 44 - Explosão da mistura CAD em 400°C.



Fonte: A autora (2019).

Para o CAD sem fibras, também foi analisada a temperatura intermediária de 300°C. No entanto, decorridos aproximadamente 40 minutos do início do ensaio, o corpo de prova aquecido novamente rompeu violentamente, semelhante ao ocorrido na temperatura de 400°C.

Os resultados demonstraram que é extremamente perigoso submeter concretos de alto desempenho em elevadas temperaturas e que a presença de fibras é essencial para evitar o lascamento explosivo de material, visto que este fenômeno não ocorreu com a mistura CAD.2.

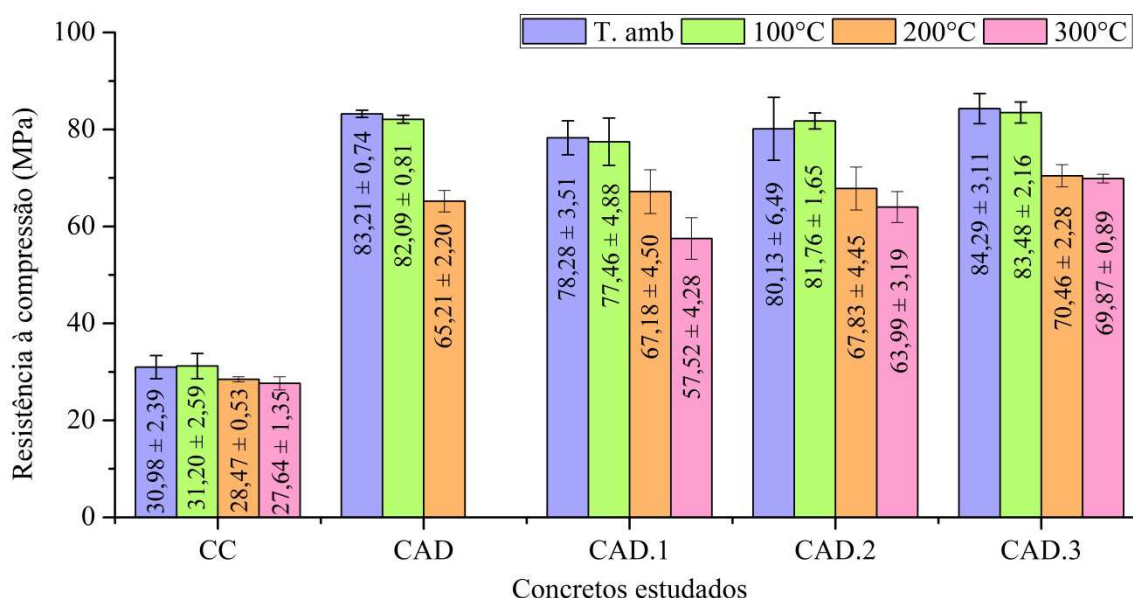
Por questões de segurança e para evitar maiores danos ao forno, foi necessário reduzir as temperaturas de estudo para 100°C, 200°C e 300°C. Mesmo que as misturas restantes tinham uma quantidade significativa de fibras, não era possível garantir que os corpos de prova não iriam explodir em temperaturas mais elevadas. Desta forma, a temperatura máxima de ensaio foi limitada em 300°C.

Os resultados a seguir incluem a resistência à compressão e perda de massa de todas as misturas, após aquecimento em 100°C, 200°C e 300°C. Além disso, são apresentados os resultados da resistência à compressão, resistência à tração indireta, módulo de elasticidade e microestrutura do CAD.2 nas temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C.

6.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM ALTAS TEMPERATURAS

A Figura 45 apresenta os resultados de resistência à compressão dos concretos para as temperaturas ambiente, 100°C, 200°C e 300°C.

Figura 45 - Resistência à compressão dos concretos em diferentes temperaturas.

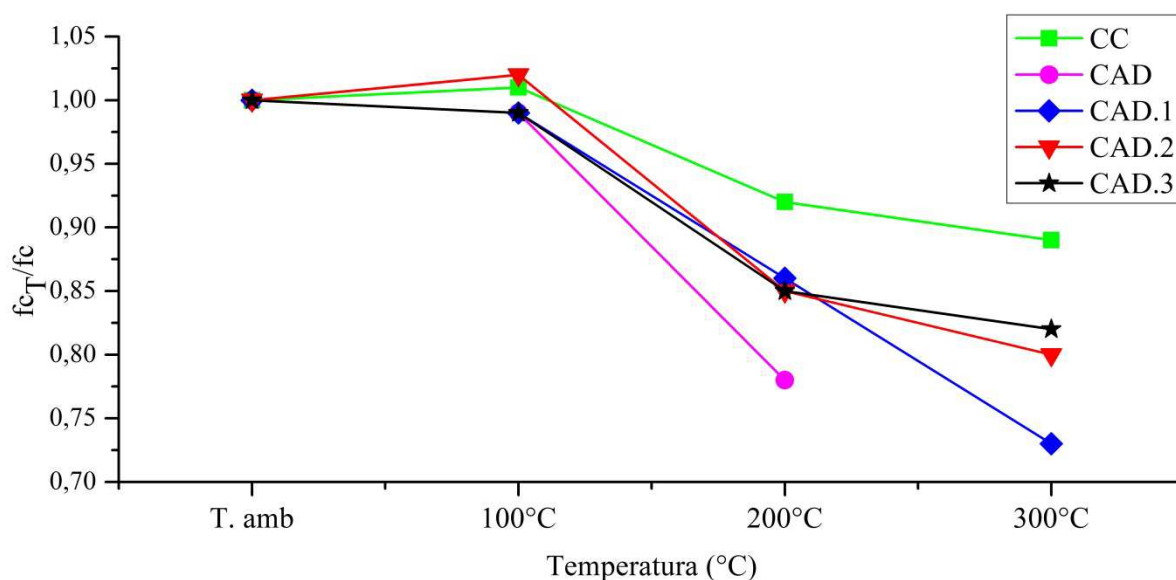


Fonte: A autora (2019).

A mistura CAD.3 foi a que apresentou resistência residual mais elevada aos 300°C: 69,87 ± 0,89 MPa. Com exceção do CAD, nenhuma mistura sofreu efeito *spalling*, indicando que o teor de 1 kg/m³ de microfibras de polipropileno já é suficiente para evitar o lascamento do concreto, até 300°C.

Os coeficientes de redução da resistência à compressão (Figura 46) foram calculados pela divisão da resistência nas temperaturas analisadas pela resistência em temperatura ambiente (f_{cT}/f_c), indicando o percentual da resistência inicial (em temperatura ambiente) que foi mantido após aquecimento.

Figura 46 - Coeficientes de redução da resistência à compressão em diferentes temperaturas.



Fonte: A autora (2019).

Neste gráfico, pode-se comprovar que o comportamento do concreto convencional em elevadas temperaturas (até 300°C) é bem superior ao concreto de alto desempenho, especialmente a mistura sem fibras. Para o CC, houve apenas um decréscimo sutil na resistência à compressão: 8,10% aos 200°C e 10,78% aos 300°C, muito próximo dos resultados apresentados por Abaeian, Behbahani e Moslem (2018) e Ma *et al.* (2019).

Já o CAD não resistiu a uma exposição de 60 minutos a 300°C, perdendo completamente sua resistência mecânica após 40 minutos de ensaio. O índice de vazios extremamente baixo do CAD, 62,16% inferior ao do CC, possivelmente foi um dos fatores que mais influenciou para que os danos fossem muito maiores nesta mistura.

A Tabela 29 apresenta uma comparação dos coeficientes de redução da resistência à compressão obtidos experimentalmente com os valores propostos pelo Eurocode 2 (CEN, 2004).

Tabela 29 - Comparação dos coeficientes de redução obtidos experimentalmente com os valores propostos pelo Eurocode 2.

Temperatura	CC			CAD		
	Resultado esperado pelo Eurocode 2	Resultado obtido	Diferença (%)	Resultado esperado pelo Eurocode 2	Resultado obtido	Diferença (%)
100°C	1,00	1,01	+0,71%	0,75	0,99	+23,98%
200°C	0,95	0,92	-3,27%	0,70	0,78	+10,68%
300°C	0,85	0,89	+4,96%	0,65	0,00	-100%

Fonte: A autora (2019).

É possível observar que os coeficientes propostos para o concreto convencional são bem adequados, visto que os resultados experimentais aproximaram-se bastante dos valores teóricos, com uma diferença inferior a 5% em todas as temperaturas.

No entanto, para o CAD as diferenças foram bem expressivas. Em 300°C, o Eurocode 2 considera uma resistência residual de 65%. No entanto, o concreto perdeu completamente sua resistência mecânica nesta temperatura.

Com relação à influência das fibras no comportamento dos concretos de alto desempenho, nota-se que as microfibras de polipropileno foram importantes para minimizar a redução da resistência à compressão dos concretos submetidos ao aquecimento. A perda de resistência em altas temperaturas foi bem inferior nos concretos com fibras, se comparado com os resultados obtidos para o CAD sem fibras.

Ao analisar a dosagem das fibras, em 200°C, o teor utilizado praticamente não influenciou no coeficiente de redução da resistência. Os coeficientes ficaram próximos de 0,85 para as três dosagens utilizadas (1, 2 e 3 kg/m³), indicando uma redução de aproximadamente 15% da resistência à compressão inicial.

Ao elevar a temperatura para 300°C, a quantidade de fibras também passou a ser um fator influente no comportamento mecânicos dos concretos. O aumento no teor de fibras contribuiu para minimizar a redução da resistência à compressão. O teor de 3 kg/m³ de fibras foi o mais efetivo, resultando em uma redução de apenas 17,11% da resistência à compressão aos 300°C. Os resultados obtidos com a dosagem de 2 kg/m³ foram bem próximos a este.

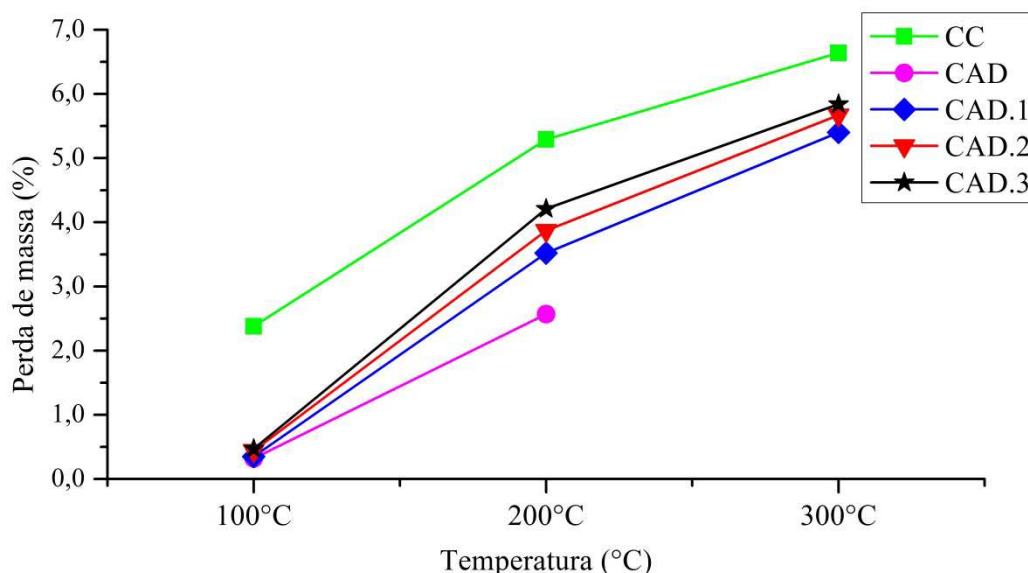
É importante destacar também que a temperatura de 100°C praticamente não afetou a resistência à compressão de todos os concretos. Em alguns casos, nas

misturas CC e CAD.2, a resistência à compressão teve um leve aumento. Segundo Behnood e Ghandehari (2009) e Xiong e Liew (2015), esse acréscimo na resistência está associado ao aumento nas forças entre as partículas de gel, as forças de Van der Waals, que ocorre quando a retração supera o aumento na porosidade devido à perda de água do material.

6.2 PERDA DE MASSA DOS CONCRETOS

A seguir são apresentados os resultados referentes à perda de massa dos concretos, nas temperaturas em estudo (Figura 47).

Figura 47 - Perda de massa dos concretos em diferentes temperaturas.



Fonte: A autora (2019).

A perda de massa dos concretos, em temperaturas inferiores a 300°C é decorrente da evaporação da água livre e a água capilar presente nos corpos de prova (PENG; HUANG, 2008, IBRAHIM; HAMID; TAHA, 2012; HAGER, 2013).

Os resultados do concreto convencional foram consideravelmente superiores às demais misturas. Isso ocorre, pois o CC apresentou absorção de água e índice de vazios bem superiores às demais misturas, possibilitando a evaporação de uma quantidade superior de água nestas temperaturas.

Para os concretos de alto desempenho, com e sem fibras, na temperatura de 100°C, a perda de massa foi praticamente a mesma: aproximadamente 0,5% da massa inicial. A partir dos 200°C, é possível notar diferenças entre os concretos com

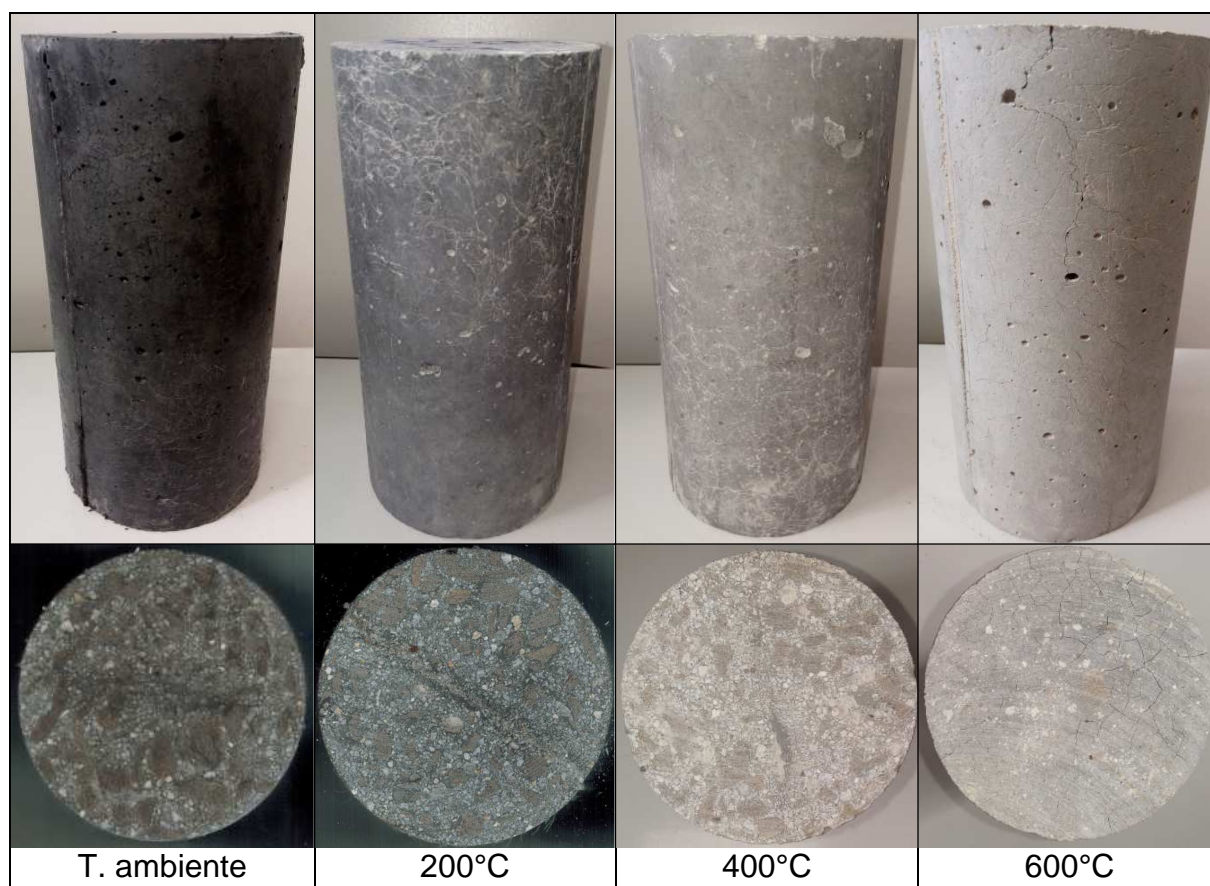
fibras. Quanto maior o teor de fibras, maior a perda de massa. Isso possivelmente está associado ao derretimento das fibras de polipropileno (em 175°C) e evaporação das fibras, resultando em uma redução na massa total dos concretos.

6.3 CAD.2 SUBMETIDO AO AQUECIMENTO

6.3.1 Aspecto visual

A Figura 48 mostra o aspecto visual da parte externa dos corpos de prova da mistura CAD.2 em diferentes temperaturas.

Figura 48 - Aparência dos corpos de prova da mistura CAD.2 em diferentes temperaturas.



Fonte: A autora (2019).

É possível observar uma nítida mudança na coloração dos corpos de prova após aquecimento. Em temperatura ambiente, o concreto apresenta uma tonalidade de cinza bem escuro, devido à presença da sílica ativa. Com o aumento da temperatura, a cor vai ficando cada vez mais clara, tornando-se bastante

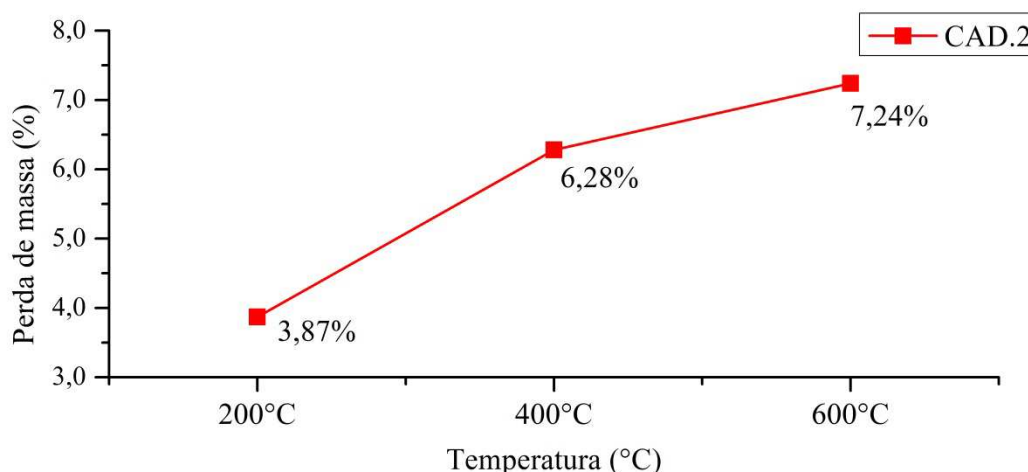
esbranquiçada aos 600°C. Essa mudança é decorrente das alterações químicas que ocorrem no material após o aquecimento, conforme Hager (2014).

Aos 600°C, nota-se o surgimento de fissuras na parte externa do corpo de prova, que contribuem ainda mais para a redução da resistência mecânica do concreto.

6.3.2 Perda de massa

Os resultados da perda de massa da mistura CAD.2, nas temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C, estão indicados na Figura 49.

Figura 49 - Perda de massa da mistura CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

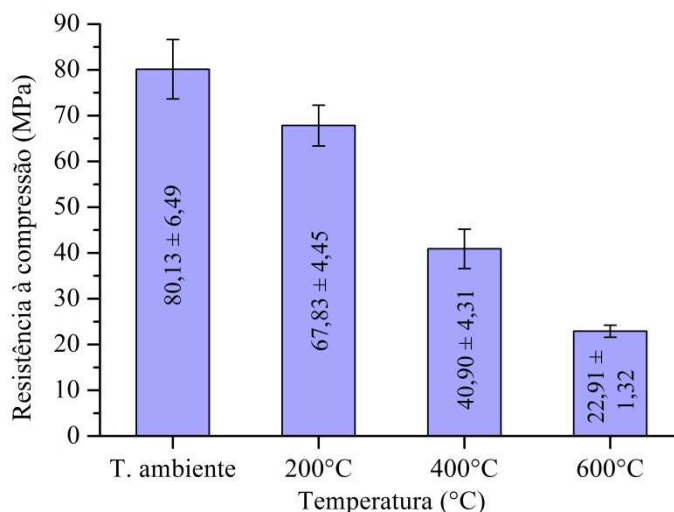
Não foram observados lascamentos visíveis em nenhuma das temperaturas analisadas. Dessa forma, a perda de massa do concreto CAD.2 é decorrente das alterações físico-químicas que ocorrem no material.

Na temperatura de 200°C, a redução da massa é decorrente principalmente da desidratação gradual da pasta cimentícia e do derretimento das fibras de polipropileno. Nesta temperatura, a água livre e a água capilar evaporam completamente, resultando na redução da massa dos corpos de prova. Aos 400°C, inicia-se também a desidratação do hidróxido de cálcio (CH). As fibras de polipropileno também evaporaram completamente aos 325°C. Próximo aos 600°C tem início também à decomposição do silicato de cálcio hidratado, contribuindo com uma pequena parcela da perda de massa total (PENG; HUANG, 2008, IBRAHIM; HAMID; TAHA, 2012; HAGER, 2013).

6.3.3 Resistência à compressão

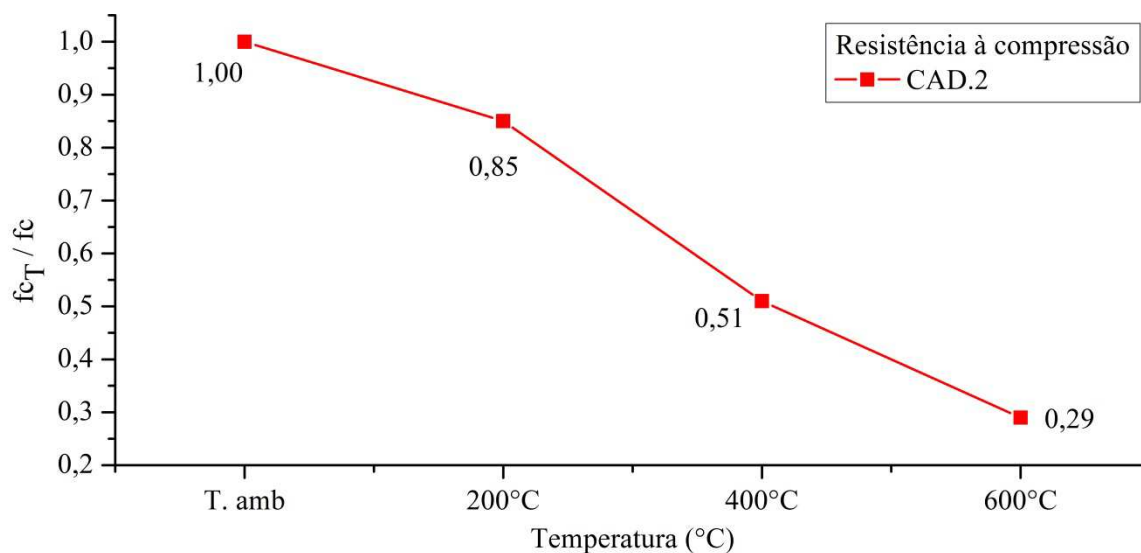
A Figura 50 apresenta os resultados da resistência à compressão em diferentes temperaturas da mistura CAD.2. Na Figura 51, foram calculados os coeficientes de redução da resistência à compressão.

Figura 50 - Resistência à compressão em diferentes temperaturas: CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

Figura 51 - Coeficientes de redução à resistência à compressão: CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

Mesmo com a adição de fibras, há uma redução considerável na resistência à compressão do concreto, mantendo apenas 29% da resistência à compressão inicial aos 600°C. Observa-se que a curva dos coeficientes de redução tende a uma reta, indicando linearidade na redução da resistência à compressão destes concretos.

A Tabela 30 apresenta uma comparação com os valores experimentais e os valores teóricos previstos por diversos modelos de previsão. Ressalta-se que os modelos teóricos não consideram a adição de fibras no concreto, no entanto, servem como comparativo para analisar a influência das microfibras na redução da resistência à compressão.

Tabela 30 - Previsão da resistência à compressão do CAD.2 em diferentes temperaturas.

Referência	Temperatura	Valor esperado (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)
Eurocode 2 (2004)	200°C	56,09	67,83	+20,93%
	400°C	36,06	40,90	+13,43%
	600°C	20,03	22,91	+14,36%
American Society of Civil Engineers - ASCE (2015)	200°C	80,13	67,83	-15,35%
	400°C	80,13	40,90	-48,96%
	600°C	55,76	22,91	-55,76%
Kodur <i>et al.</i> (2004)	200°C	60,10	67,83	+11,40%
	400°C	60,10	40,90	-31,94%
	600°C	36,86	22,91	-37,85%
Chang <i>et al.</i> (2006)	200°C	72,12	67,83	-6,32%
	400°C	52,08	40,90	-27,35%
	600°C	32,05	22,91	-28,52%
Krishna; Priyadarsini; Naraynan (2019)	200°C	73,34	67,83	-8,12%
	400°C	62,20	40,90	-34,25%
	600°C	36,56	22,91	-37,34%

Fonte: A autora (2019).

É possível observar que a maioria dos modelos não foi adequada para prever a resistência à compressão dos concretos. Em grande parte dos casos, os resultados teóricos superestimaram a resistência à compressão, enquanto que na prática, os valores obtidos foram consideravelmente menores, mesmo com a utilização de fibras para minimizar os efeitos da exposição em elevadas temperaturas.

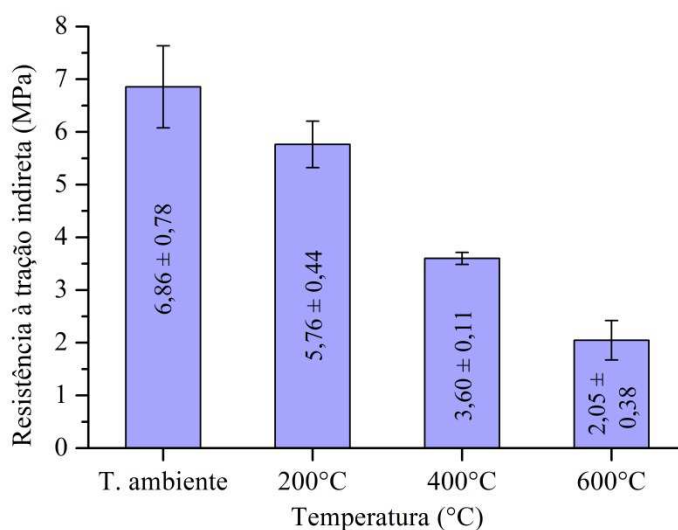
Uma análise importante a ser feita é com relação ao modelo proposto pelo Eurocode 2, para concretos com resistência entre 80 e 90 MPa, referência internacional em estruturas de concreto armado em situações de incêndio. Nota-se que os valores de resistência obtidos experimentalmente foram superiores aos valores propostos pela norma europeia. Isso comprova que as fibras contribuem

efetivamente para minimizar a redução da resistência à compressão de concretos de alta resistência em elevadas temperaturas.

6.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

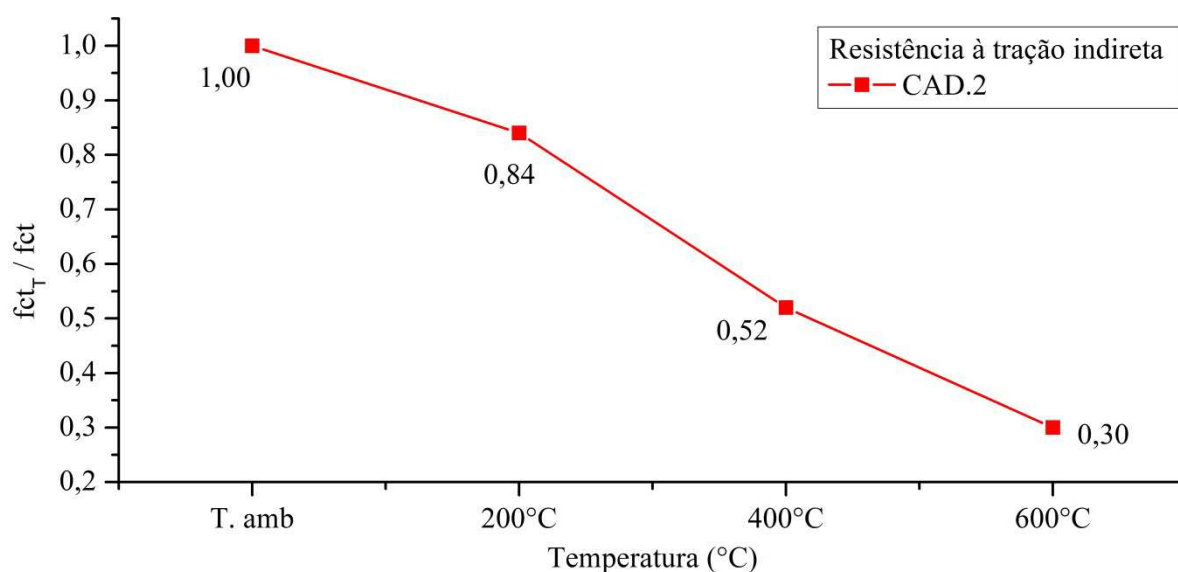
Os resultados da resistência à tração por compressão diametral e os coeficientes de redução da mistura CAD.2 são apresentados nas Figuras 52 e 53.

Figura 52 - Resistência à tração por compressão diametral em diferentes temperaturas: CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

Figura 53 - Coeficientes de redução à resistência à tração indireta: CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

A resistência à tração por compressão diametral também reduziu consideravelmente após exposição em elevadas temperaturas. Aos 600°C, o concreto manteve apenas 30% da resistência inicial.

Comparando os coeficientes de redução da resistência à compressão (Figura 51) e resistência à tração indireta (Figura 53), nota-se que os valores são bem semelhantes, em todas as temperaturas. Isso indica que na mistura estudada, CAD.2, a resistência à compressão e a resistência à tração foram afetadas da mesma maneira pela exposição em elevadas temperaturas, resultando em uma redução semelhante nas duas propriedades mecânicas estudadas.

A Tabela 31 apresenta uma comparação com os valores experimentais de resistência à tração e os valores teóricos previstos por diversos modelos de previsão.

Tabela 31 - Previsão da resistência à tração indireta do CAD.2 em diferentes temperaturas.

Referência	Temperatura	Valor esperado (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)
Eurocode 2 (CEN, 2004)	200°C	5,49	5,76	+4,72%
	400°C	2,74	3,60	+23,78%
	600°C	0	2,05	+100%
Chang <i>et al.</i> (2006)	200°C	5,49	5,76	+4,72%
	400°C	3,85	3,60	-6,81%
	600°C	1,92	2,05	+6,14%
Krishna; Priyadarsini; Narayan (2019)	200°C	5,40	5,76	+6,18%
	400°C	4,17	3,60	-15,82%
	600°C	1,92	2,05	-6,14%

Fonte: A autora (2019).

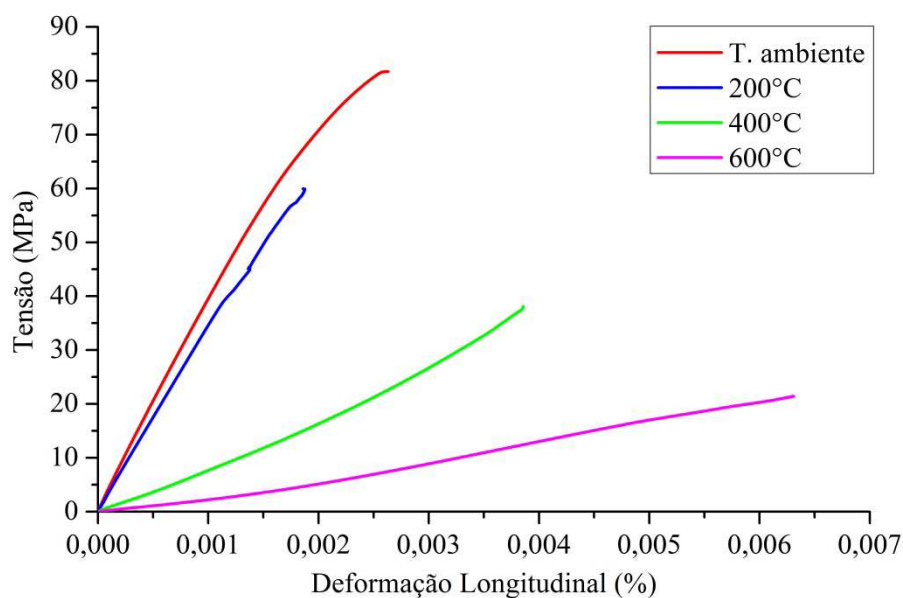
O modelo apresentado pelo Eurocode 2 é o que apresentou maiores diferenças com relação aos valores experimentais. A norma considera uma redução mais brusca na resistência à tração. Entretanto, deve-se considerar que este modelo não considera a presença de fibras no concreto, que contribuem para minimizar os efeitos de elevadas temperaturas no concreto.

O modelo mais adequado foi o de Chang *et al.* (2006), com diferenças aceitáveis entre os valores experimentais e teóricos.

6.3.5 Módulo de elasticidade

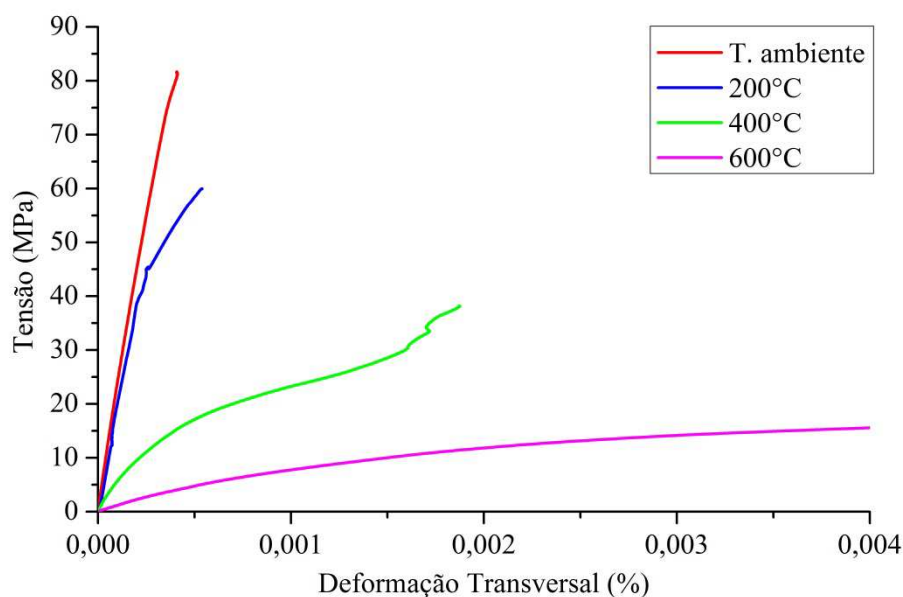
As Figuras 54 e 55 apresentam as curvas de tensão-deformação longitudinal e transversal da mistura CAD.2, nas temperaturas ambiente, 200°C, 400°C e 600°C.

Figura 54 - Curvas de tensão-deformação longitudinal em função da temperatura: CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

Figura 55 - Curvas de tensão-deformação transversal em função da temperatura: CAD.2.



Fonte: A autora (2019).

É possível visualizar um aumento considerável nas deformações longitudinais e transversais. Além disso, para temperaturas mais elevadas, as curvas se tornam

mais achatadas e a ductilidade induzida termicamente é mais acentuada, confirmando os resultados apresentados por Chang *et al.* (2016).

Os valores de módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (Tabela 32) foram calculados no ponto com tensão equivalente a 40% da carga de ruptura.

Tabela 32 - Resultados do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em diferentes temperaturas.

Temperatura	Módulo de elasticidade (GPa)	Coeficiente de Poisson
T. ambiente	40,09	0,17
200°C	34,80	0,18
400°C	8,08	0,22
600°C	2,93	0,40

Fonte: A autora (2019).

Os valores obtidos experimentalmente em temperatura ambiente foram comparados com alguns modelos de regressão (Tabela 33), sem considerar a presença das fibras.

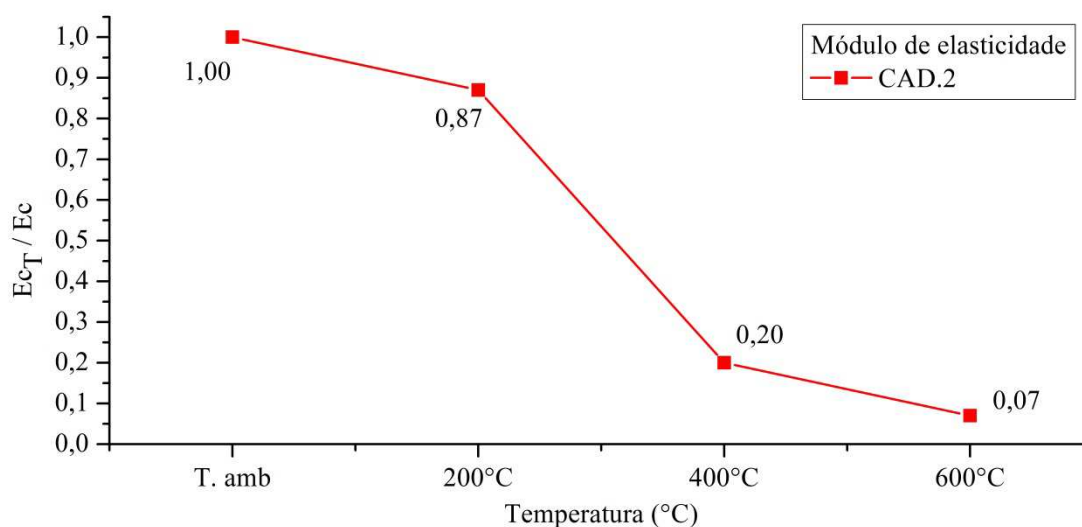
Tabela 33 - Previsão do módulo de elasticidade do CAD.2 em temperatura ambiente.

Referência	Valor esperado (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)
Eurocode 2 (CEN, 2004)	41.313,24	40.086,39	2,97%
ACI 363.R-10 (2010)	36.908,83	40.086,39	8,61%
ACI 318.R-11 (2011)	41.571,10	40.086,39	3,57%
NBR 6118 (ABNT, 2014a)	45.406,93	40.086,39	11,72%

Fonte: A autora (2019).

As equações analisadas foram adequadas para prever o módulo de elasticidade da mistura CAD.2 em temperatura ambiente a partir de sua resistência à compressão. A equação proposta pelo Eurocode 2 (CEN, 2004), foi a que mais se aproximou do valor experimental, com uma diferença de apenas 2,97%. Esses resultados indicam que possivelmente as fibras não têm uma influência considerável no módulo de elasticidade, assim como observado por Eidan *et al.* (2019).

Na Figura 56 estão indicados os coeficientes de redução do módulo de elasticidade.

Figura 56 - Coeficientes de redução do módulo de elasticidade: CAD.2.

Fonte: A autora (2019).

Houve uma diminuição brusca no módulo de elasticidade do concreto CAD.2 após aquecimento. Entre 200°C e 400°C, há uma redução de 66,65%. Além disso, após aquecimento em 600°C, o concreto preservou apenas 7,31% do valor inicial.

A redução do módulo de elasticidade com a temperatura foi bem maior do que as demais propriedades mecânicas analisadas. Segundo Wu *et al.* (2002) e Castro, Tiba e Pandolfelli (2011), para um mesmo tratamento térmico, a redução do módulo é maior do que a redução da resistência à compressão.

Na Tabela 34 são apresentados alguns valores de módulo de elasticidade, com a variação da temperatura, previstos com modelos de regressão.

Tabela 34 - Previsão da variação do módulo de elasticidade do CAD.2 em altas temperaturas.

Referência	Temperatura	Valor esperado (MPa)	Valor obtido (MPa)	Diferença (%)
Xiao e Konig (2004)	200°C	38.883,79	34.801,24	-10,50%
	400°C	21.406,13	8.082,25	-62,24%
	600°C	14.671,62	2.932,35	-80,01%
Krishna; Priyadarsini; Naraynan (2019)	200°C	30.870,53	34.801,24	+12,73%
	400°C	20.592,38	8.082,25	-60,75%
	600°C	10.314,23	2.932,35	-71,60%

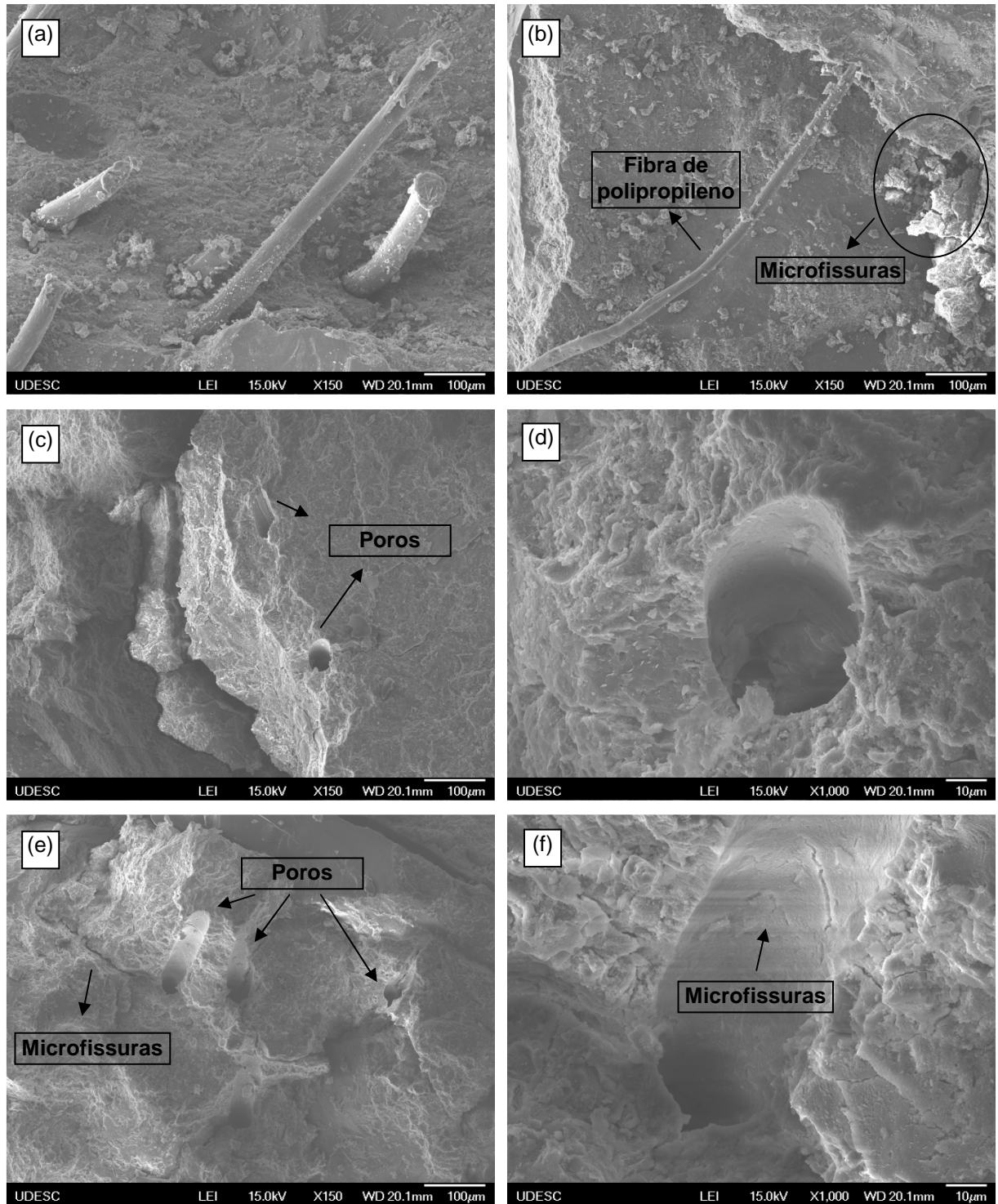
Fonte: A autora (2019).

Para a temperatura de 200°C, os dois modelos apresentaram resultados consideráveis. No entanto, para 400°C e 600°C, as equações teóricas superestimaram o módulo de elasticidade, considerando uma redução bem inferior à que realmente ocorreu na prática.

6.3.6 Microestrutura

As imagens da microestrutura da mistura CAD.2 (Figura 57) antes e depois do aquecimento foram obtidas por MEV de amostras não embutidas.

Figura 57 - Microestrutura da mistura CAD.2. (a) T. amb; (b) 200°C; (c) (d) 400°C; (e) (f) 600°C.



Fonte: A autora (2019).

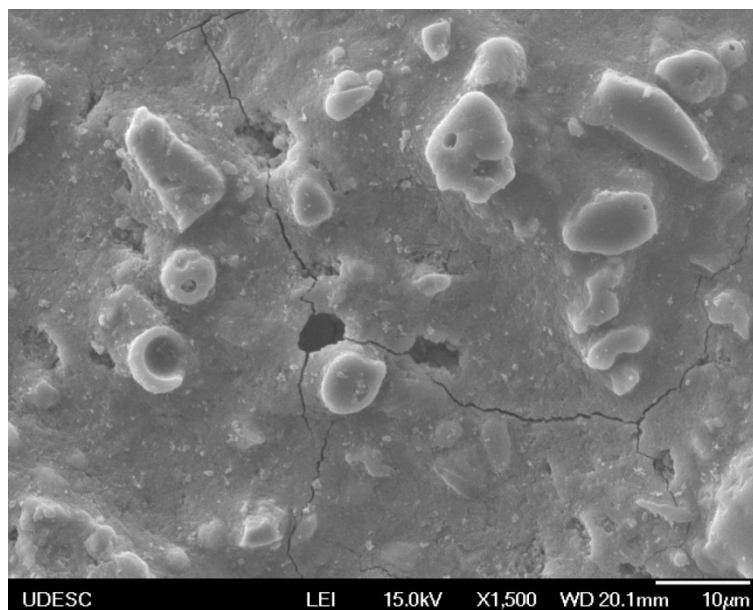
Na Figura 57a, com uma ampliação de 150 vezes do concreto em temperatura ambiente, é possível observar a presença das fibras de polipropileno dispersas na matriz cimentícia. Após o aquecimento em 200°C (Figura 57b), boa parte das fibras derreteu, restando apenas alguns resquícios de material. Deve-se considerar que a temperatura analisada é muito próxima da temperatura de fusão do polipropileno (170°C). Aos 200°C, é possível observar também o surgimento de algumas microfissuras no concreto, responsáveis por uma grande parcela da redução da resistência mecânica nesta temperatura.

Aos 400°C, as fibras desapareceram completamente, confirmando os resultados da análise térmica, que indicou o início da degradação em 325°C, com uma perda de 100% de massa nessa temperatura. Para uma ampliação de 150 vezes (Figura 57c) já é possível visualizar a presença dos poros (canais interligados) originados pela evaporação das fibras de polipropileno. Em uma ampliação de 1000 vezes (Figura 57d), é possível observar o canal formado pela evaporação das fibras, responsável pelo aumento da permeabilidade do concreto em temperaturas elevadas.

Na Figura 57e (ampliação de 150 vezes), com uma amostra exposta aos 600°C, a presença dos poros é intensificada. As microfissuras tornam-se mais evidentes, distribuindo-se por toda a porção analisada. Analisando os canais interligados (Figura 57f), percebe-se também a presença de microfissuras na direção radial do túnel formado pela evaporação das fibras. Segundo Khoury e Willoughby (2008) e Li, Tan e Yang (2008), o coeficiente de expansão térmica do polipropileno à temperatura ambiente é cerca de dez vezes maior do que o do concreto e a proporção é ainda mais alta em temperaturas elevadas. Dessa forma, a expansão das fibras de polipropileno pode causar um aumento considerável nas tensões de tração, levando ao surgimento de microfissuras na interface da fibra com a matriz cimentícia.

A Figura 58 apresenta uma amostra plana, polida e embutida em resina, após exposição durante 60 minutos em 600°C. É possível visualizar que os poros do concreto gerados pela evaporação das fibras estão interligados por meio de microfissuras, o que permite a dissipação das poro-pressões geradas no concreto, minimizando a redução dos danos provocados pela exposição em elevadas temperaturas no concreto.

Figura 58 - Canais interligados formados pela evaporação do polipropileno em 600°C (1500 vezes).



Fonte: A autora (2019).

7 CONCLUSÕES

Na dosagem dos concretos de alto desempenho, os materiais selecionados foram adequados para garantir elevada resistência à compressão das misturas. A sílica da casca de arroz e a sílica ativa em suspensão foram classificadas como materiais pozolânicos, o que resulta em uma grande reatividade para a pasta cimentícia. O aditivo superplastificante, à base de éter policarboxilatos, na dosagem adequada de 1,0% em relação à massa de cimento Portland, permitiu uma grande redução da quantidade de água da mistura. Além disso, a utilização de uma brita de origem basáltica contribuiu para melhorar ainda mais as propriedades mecânicas dos concretos. O basalto apresentou abrasão de Los Angeles bem superior à do gnaiss, indicando que a brita de basalto é mais adequada para a produção de concretos de alto desempenho.

A dosagem adotada para a sílica ativa em suspensão foi de 10% com relação à massa de cimento, em conjunto com 8,5% de sílica da casca de arroz.

A seleção adequada de materiais e a adoção de um fator água/materiais cimentícios baixo (0,26), garantiu que todos os concretos de alto desempenho, com ou sem fibra, pudessem ser classificados no Grupo II da NBR 8953 (ABNT, 2015), com resistências entre 55 e 100 MPa, mesmo com idades baixas, aos 7 dias.

A adição de grandes quantidades de microfibras de polipropileno (2 kg/m³ e 3 kg/m³) prejudicou a trabalhabilidade das misturas, sem comprometer a integridade dos corpos de prova durante o adensamento na mesa vibratória. O teor de 1 kg/m³ mostrou-se bastante adequado, visto que não alterou o abatimento do concreto.

Com relação aos resultados da absorção de água e índice de vazios, foram obtidos valores extremamente baixos, minimizando a penetração de agentes nocivos e aumentando a vida útil do material.

Para a resistência à compressão, a análise de variância indicou que as fibras não influenciaram os resultados desta propriedade, mesmo em teores mais elevados. Na resistência à tração por compressão diametral, houve um aumento discreto nos resultados com o aumento no teor de fibras. No entanto, as diferenças não foram estatisticamente significativas.

A condutividade térmica foi bastante afetada pela porosidade do concreto. No entanto, a adição de fibras não influenciou nesta propriedade térmica, mesmo para teores elevados de polipropileno.

Nos ensaios de durabilidade por meio de ataque por sulfato, tanto a resistividade elétrica como a variação de massa indicaram uma vida útil maior para o concreto de alto desempenho. Além disso, ficou comprovado que o concreto convencional com resistência característica de 25 MPa não é adequado para exposição em ambientes agressivos, onde há contato com água sulfatada.

Considerando apenas as questões técnicas, voltadas para aplicações práticas, o concreto de alto desempenho produzido pode ser utilizado em indústrias de estruturas de concreto pré-moldado, garantindo a produção de peças com qualidade e elevada durabilidade. Ressalta-se que em uma análise financeira de custos, sempre deve ser levado em consideração o custo-benefício global relacionado à utilização de um concreto de alta resistência em elementos estruturais pré-moldados e não apenas o custo unitário material, visto que suas vantagens são inúmeras, possibilitando também a redução da seção transversal dos elementos estruturais.

Os resultados gerais da pesquisa mostraram que é possível produzir concretos com diferentes teores de fibras de polipropileno, na faixa entre 1 kg/m³ e 3 kg/m³, sem comprometer suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas.

A exposição dos concretos em elevadas temperaturas comprovou que o CAD apresenta uma deterioração extremamente rápida, intensificada pela ocorrência do efeito *spalling*. Os resultados reforçam ainda mais o risco relacionado à ocorrência de incêndios em edifícios com concretos de alta resistência, que normalmente são bastante altos e esbeltos, o que dificulta ainda mais a evacuação de seus moradores.

Ficou comprovado também que o comportamento do concreto convencional em elevadas temperaturas (até 300°C) é bem superior ao CAD, especialmente a mistura sem fibras.

A utilização das microfibras de polipropileno teve uma importância considerável para minimizar a redução da resistência à compressão dos concretos submetidos a elevadas temperaturas. Os teores de 2 e 3 kg/m³ de microfibras foram os mais efetivos. Ficou comprovado que a seleção adequada dos materiais constituintes de uma edificação pode garantir que a estrutura apresente segurança em condições reais de incêndio.

Na análise microestrutural foi possível identificar os canais interligados formados pela evaporação das fibras de polipropileno, responsáveis pelo aumento

da permeabilidade do concreto em altas temperaturas, prevenindo a formação das zonas de alta pressão nos poros do material e reduzindo consideravelmente o efeito *spalling*.

Com base no conjunto de toda a pesquisa, a mistura que apresentou o melhor desempenho geral foi a que continha 2 kg/m³ de microfibras de polipropileno. Além de melhorar as propriedades mecânicas em temperaturas elevadas, até 300°C, foram verificadas melhorias na resistência à tração por compressão diametral, sem afetar a resistência à compressão e a trabalhabilidade do material.

REFERÊNCIAS

- ABAEIAN, R.; BEHBAHANI, H. P.; MOSLEM, J. S. Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 631-638, mar. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.064.
- AFROUGHSAKET, V.; OZBAKKALOGLU, T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 73-82, set. 2015. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051.
- AITCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.
- AITCIN, P. C.; LESSARD, J.-M. The composition and design of high-strength concrete and ultrahigh-strength concrete. Developments in the **Formulation and Reinforcement of Concrete (second edition)**, p. 171-192, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-08-102616-8.00008-3.
- AL-ORAIMI, S. K.; TAHA, R.; HASSAN, H. F. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 20, p. 499-503, set. 2006. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2004.12.005.
- ALEX, J.; DHANALAKSHIMI, J.; AMBEDKAR, B. Experimental investigation on rice ash as cement replacement on concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 353-362, nov. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.150.
- ALSADEY, S.; SALEM, M. Influence of polypropylene fiber on strength of concrete. **American Journal of Engineering Research**, v. 5, n. 7, p. 223-226, 2016. DOI: 10.9790/1684-1305060920
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE COMMITTEE - ACI. Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete. **ACI 207.2R-07**, Farmington Hills, MI, 2007.
- _____. Guide for Modeling and Calculating Shrinkage and Creep in Hardened Concrete. **ACI 209.2R-08**, Farmington Hills, 2008.
- _____. Report on High Strength Concrete. **ACI 363.R-10**, Farmington Hills, 2010.
- _____. Building code requirements for structural concrete. **ACI 318.R-11**, Farmington Hills, 2011.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL - ASTM. **ASTM C496M-04**: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. Pensilvânia, 2004.

_____. **ASTM C618-17**: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Pensilvânia, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - ASCE. Calculation of temperature and fire resistance of structural members. **Structural Fire Protection**, p. 159-221, dez. 2015. DOI: 10.1061/9780872628885.ch05.

ARTOGLU, E. Discussion of “relationship between splitting tensile strength and the compressive strength. **IMO Technical Journal**, v. 4, p. 1059-1062, out. 1995.

ARTOGLU, N.; GIRGIN, C.; ARTOGLU, E. Evaluation of ratio between splitting tensile strength and compressive strength for concretes up to 120 MPa and its application in strength criterion. **ACI Materials Journal**, v.103, n. 1, p. 18-24, jan. 2006.

ARUNACHALAM, A.; JAYAKUMAR, K. Briefing: performance of polypropylene fibre in high-performance concrete. **Construction Materials**, v. 168, p. 263-266, jun. 2015. DOI: 10.1680/coma.15.00004.

ASADI, I.; SHAFIGH, P.; HASSAN, Z. F. B. A.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete - a review. **Journal of Building Engineering**, v. 20, p. 81-93, nov. 2018. DOI: 10.1016/j.job.2018.07.002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 7215**: cimento Portland - determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR NM 67**: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 51**: agregado graúdo - ensaio de abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro, 2001.

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

_____. **NBR 15220**: desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

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

_____. **NBR 7211**: agregado para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009b.

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

_____. **NBR 12821**: preparação de concreto em laboratório - procedimento. Rio de Janeiro, 2009d.

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

_____. **NBR 9775**: agregado miúdo - determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman - método de ensaio. Rio de Janeiro, 2011a.

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

_____. **NBR 15200**: projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR 7117**: medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2014a.

_____. **NBR 5752**: materiais pozolânicos - determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014b.

_____. **NBR 12653**: materiais pozolânicos - requisitos. Rio de Janeiro, 2014c.

_____. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais - classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5738**: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 5739**: Concreto - ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

AZARSA, P.; GUPTA, R. Electrical resistivity of concrete for durability evaluation: a review. **Materials Science and Engineering**, v. 17, p. 1-30, maio 2017. DOI: 10.1155/2017/8453095.

BARBOSA, M. B.; PEREIRA, A. M.; AKASAKI, J. L.; FIORITI, C. F.; FAZZAN, J. V.; TASHIMA, M. M.; BERNABEU, J. J. P.; MELGES, J. L. P. Resistência ao impacto e à abrasão de concreto de alto desempenho com resíduos de cinza de casca de arroz e borracha de pneus. **RIEM-Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 6, n. 5, p. 811-831, set. 2013. DOI: 10.1590/S1983-41952013000500007.

BALESTRA, C.; E.; T.; NAKANO, A. Y.; SAVARIS, G.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Reinforcement corrosion risk of marine concrete structures evaluated through electrical resistivity: proposal of parameters based on field structures. **Ocean Engineering**, v. 187, set. 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106167.

BANGI, M. R.; Horiguchi, T. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1150-1156, nov. 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.07.001.
BARROS, A. R. de; **Avaliação do comportamento de vigas de concreto auto-adensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

BEHNOOD, A.; GHANDEHARI, M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 8, p. 1015-1022, nov. 2009. DOI: 10.1016/j.firesaf.2009.07.001.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced Cementitious Composites**. 2. ed. [S.l.]: Taylor & Francis Group, 2007.

BILODEAU, A.; KODUR, V. K. R; HOFF, G. C. Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 2, p. 163-174, fev. 2004. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00085-4.

BOFANG, Z. **Thermal stresses and temperature control of mass concrete**. Butterworth- Heinemann, 2014.

BOURCHY, A.; BARNES, L.; BESSETTE, L.; CHALENCON, F.; JORON, A.; TORRENTI, J. M. Optimization of concrete mix design to account for strength and hydration heat in massive concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, v. 103, p. 233-241, out. 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.05.005.

BROOMFIELD, J.; MILLARD, S. Measuring concrete resistivity to assess corrosion rates. **The Concrete Society**, v. 36, n. 2, p. 37-49, 2002.

CAETANO, H.; FERREIRA, G.; RODRIGUES, J. P. C.; PIMIENTA, P. Effect of the high temperatures on the microstructure and compressive strength of high strength fibre concretes. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 717-736, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.074.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPITELLI, V. C. Concreto de cimento Portland: um método de dosagem. **Engenharia Civil UM**, Ponta Grossa, n. 20, p. 1-12, 2004.

CANTY, A.; RIPLEY, B. **Boot**: Bootstrap R (S-plus) Functions. R package version 1. 3-20, 2017.

CAO, Q.; CHENG, Y.; CAO, M.; GAO, Q. Workability, strenght and shrinkage of fiber reinforced expansive self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 178-185, jan. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.076.

CASTRO, A. L. de; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas - Revisão. **Cerâmica**, São Paulo, v. 57, n. 341, p. 22-31, mar. 2011. DOI: 10.1590/S0366-69132011000100003.

CHANG, Y. F.; CHEN, Y. H.; SHEU, M. S.; YAO, G. C. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 10, p. 1999-2005, out. 2006.
DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.029.

CHEN, F.; GAO, J.; QI, B.; SHEN, D.; LI, L. Degradation processo f concrete subject to combined sulfa-chloride attack under drying-wetting cycles and flexural loading. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 164-171, out. 2017.
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.074.

CHENG, M.-Y.; CHOU, J.-S.; ROY, A. F. V.; WU, Y.-W. High performance concrete compressive strength prediction using time-weighted evolutionary fuzzy support vector machines inference model. **Automation in Construction**, v. 28, p. 106-115, dez. 2012. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.07.004.

CHOU, J.-S.; TSAI, C.-F. Concrete compressive strength analysis using a combined classification and regression technique. **Automation in Construction**, v. 24, p. 52-60, jul. 2012. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.02.001.

CHUNG, S.-Y.; HAN, T.-S.; KIM, S.-Y.; KIM, J.-H. J.; YOUM, K. S.; LIM, J.-H. Evaluation of effect of glass beads on termal conductivity of insulation concrete using micro CT images and probability functions. **Cement and Concrete Composites**, v. 65, p. 150-162, jan. 2016. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.011.

CINCOTTO, M. A. Reações de hidratação e pozolânicas. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 1, São Paulo: IBRACON, 2011, p. 381-413.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON - CEB. **Diagnosis and assessment of concrete structures**: state-of-the-art report. Lausanne, 1988 (Bulletin d'Informatio, 192).

_____. Evaluation of the time dependente behaviour of concrete. **CEB FIP Model code for concrete structures**. Lausanne, 1991.

COMITÉ EUROPEU DE NORMATIZAÇÃO - CEN. **Eurocode 2**: design of concrete structures - Part 1-2: general rules - structural fire design. Brusels, 2004.

COMPANHIA ÁGUAS DE JOINVILLE - CAJ. **Relatório Anual de 2016**. Joinville, 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Técnicas experimentais para estudo da microestrutura. *In*: ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed., São Paulo: IBRACON, 2010, p. 402-430.

DAUJI, S.; BHARGAVA, K. Estimation of concrete characteristic strength from limited data by bootstrap. **Journal of Asian Concrete Federation**, v. 2, n. 1, 2016; p. 81-94. DOI: 10.18702/acf.2016.06.2.1.81.

DAVISON, A. C.; HINKLEY, D. V. Bootstrap methods and their applications. Cambrige university press, Cambrige, 1997. ISBN 0-521-57391-2.

DI BELLA, C. WRYZKOWSKI, M.; LURA, P. Evaluation of the ultimate drying shrinkage of cement-based mortars with poroelastic models. **Materials and Structures**, v. 50-52, 2016; p. 1-13. DOI: 10.1617/s11527-016-0870-0.

DWAIKAT, M. B.; KODUR, V. K. R. Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems. **Fire Safety Journal**, v. 44, n. 3, p. 425-434, abr. 2009. DOI: 10.1016/j.firesaf.2008.09.001.

EFFTING, C. **Desenvolvimento de revestimentos cerâmicos confortáveis termicamente**. 2008. 150f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. **An Introduction to the Bootstrap**. CRC press, 1994.

EIDAN, J.; RASOOLAN, I.; REZAEIAN, A.; POORVEIS, D. Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. **Construction and Building Materials**, Alvaz, v. 198, p. 195-206, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.209

ERDAL, H. I.; KARAKURT, O.; NAMLI, E. High performance concrete compressive strength forecasting using esamble models based on discrete wavelet transform. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, n. 4, abr. 2013; p. 1246-1254. DOI: 10.1016/j.engappai.2012.10.014.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. *In*: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 2, São Paulo: IBRACON, 2011, p. 1327-1365.

FLETCHER, I.; BORG, A.; HITCHEN, N.; WELCH, S. Performance of concrete in fire: a review of the state of the art, with a case study of the Windsor Tower Fire. **Proceeding of the Fourth International Workshop on Structures in Fire**, Aveiro, 2006.

FU, Y.; LI, L. Study on mechanism of termal spalling in concrete exposed to elevated temperatures. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 361-376, jan. 2011. DOI: 10.1617/s11527-010-9632-6.

GÜL, R.; OKUYUKU, E.; TÜRKMEN, I.; AYDIN, A. C. Thermo-mechanical properties of fiber reinforced raw perlite concrete. **Materials Letters**, v. 61, n. 29, p. 5145-5149, dez. 2007. DOI: 10.1016/j.matlet.2007.04.050.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences**, v. 61, n. 1, p. 145-154, nov. 2013. DOI: 10.2478/bpasts-2013-0013.

HAGER, I. Colour change in heated concrete. **Fire technology**, v. 50, n. 4, p. 945-958, jul. 2014. DOI: 10.1007/s10694-012-0320-7.

HEIKAL, M.; EL-DIDAMONY, H.; SOKKARY, T. M.; AHMED, I. A. Behavior of composite cement patês containig microsilica and fly ash at elevated temperature.

Construction and Building Materials, v. 38. n.1, p. 1180-1190, jan. 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.069.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

HOSSAIN, K. M. A. High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: performance at high temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 6, p. 535-545, jul. 2006. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013.

HUI-SHENG, S.; BI-WAN, X.; XIAO-CHEN, Z. Influence of mineral admixtures on compressive and carbonation of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1980-1985, 2009. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.021.

IBRAHIM, R. K.; HAMID, R.; TAHA, M. R. Fire resistance of high volume fly ash mortars with nanosilica addition. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 779-786, nov. 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.05.028.

IGNJATOVÍČ, I. S.; SAS, Z.; DRAGAS, J.; SOMLAI, J.; KOVÁCS, T. Radiological and material characterization of high volume fly ash concrete. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 168, n. 1, p. 38-45, mar. 2017. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2016.06.021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **ISO 834**: fire-resistance tests - elements of building construction. Geneva, 1999.

JABER, A.; GORGIS, I.; HASSAN, M. Relationship between splitting tensile and compressive strengths for self-compacting concrete containing nano-and micro sílica. **MATEC Web Conferences**, v. 162, p. 1-8, 2018. DOI: 10.1051/mateconf/201816202013.

KÁNEMA, M.; PLIYA, P.; NAOMOWÉ, A.; GALLIAS, J. Spalling, thermal and hydrous behavior of ordinary and high-strength concrete subjected to elevated temperature. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 7, p. 921-930, jul. 2011. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000272.

KANG, S.; HONG, S.; MOON, J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 115, p. 389-400, jan. 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.004.

KASS, R. E.; EDEN, U. T.; BROWN, E. N. **Analysis of Neural Data**. New York: SPRINGER, 2014.

KHALIQ, W.; KODUR, V. Effectiveness of polypropylene and steel fibers in enhancing fire resistance of high-strength concrete columns. **Journal of Structure Engineering**, v. 144, n. 3, p. 1-12, mar. 2018. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001981.

KHALIQ, W.; KODUR, V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 11, p. 1112-1122, nov. 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.06.012.

KHOURY, G. A.; WILLOUGHBY, B. Polypropylene fibres in heated concrete. Part.1: molecular structure and materials behaviour. **Magazine of Concrete Research**, v. 60, n. 2, p. 125-136, mar. 2008. DOI: 10.1680/macr.2008.60.2.125.

KODUR, V. Properties of concrete at elevated temperatures. **International Scholarly Research Notices**, v. 2014, p. 1-15, 2014. DOI: 10.1155/2014/468510.

KODUR, V. K. R.; WANG, T. C.; CHENG, F. P. Predicting the fire resistance behaviour of high strength concrete columns. **Cement and concrete composites**, v. 26, n. 2, p. 141-153, fev. 2004. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00089-1.

KRISHNA, A.; PRIYADARSINI, R. S.; NARAYANAN, S. Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. **Procedia Structural Integrity**, v. 14, p. 384-394, 2014. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.05.047.

LAU, A.; ANSON, M. Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 9, p. 1698-1707, set. 2006. DOI:10.1016/j.cemconres.2006.03.024.

LAYSSI, H.; GHODS, P.; ALIZADEH, A. R.; SALEHI, M. Electrical resistivity of concrete. **Concrete International**, v. 1, p. 1-6, maio 2019. DOI: 10.1155/2017/8453095.

LI, J.C.; TAN, K. H.; YAO, Y. A new perspective on nature of fire induced spalling in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 184, p. 581-590, set. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.204.

LI, Y.; PIMIENTA, P.; PINOTEAU, N.; TAN, K. H. Effect of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on explosive spalling and pore pressure in ultra-high-performance concrete (UHPC) at elevate temperature. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 62-71, mar. 2019. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.02.016.

LI, Y. TAN, K. H.; YANG, E. Influence of aggregate size and inclusion of polypropylene and steel fibers on the hot permeability of ultra-high performance concrete (UHPC) at elevate temperature. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 629-637, abr. 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.105.

LIU, P. S.; CHEN, G. F. Characterization Methods: phisical properties. **Porous Materials**, p. 495-532, 2014. DOI: 10.1016/B978-0-12-407788-1.00010-1.

MA, Q.; GUO, R.; ZHAO, Z.; LIN, Z.; HE, K. Mechanical properties of concrete at high temperature - a review. **Construction and Building Materials**, v. 93, n. 1, p. 371-383, set. 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.05.131.

MAGALHÃES, F. C.; REAL, M. V. Análise probabilística do concreto reforçado com fibras utilizado na construção do dique seco do Estaleiro Rio Grande. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 4, n. 2, p. 324-346, jun. 2011. DOI: 10.1590/S1983-41952011000200009.

MAZZUCCO, G.; MAJORANA, C. E.; SALOMONI, V. A. Numerical simulation of polypropylene fibres in concrete materials under fire conditions. **Computers & Structures**, v. 154, p. 17-28, jul. 2015. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.03.012.

MC BAUCHEMIE. **Manual técnico**: linha de produtos 2016/2017. 2016.

MEDEIROS-JUNIOR, R. A.; LIMA, M. G. Electrical resistivity of unsaturated concrete using diferente types of cement. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 11-16, mar. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.168.

MEHTA; P. K.; AİTCIN, P. C. Principles underlying production of high-performance concrete. **Cement, Concrete and Aggregates**, Winter, v. 12, n. 2, p. 70-78, 1990. DOI: 10.1520/CCA10274J.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedade e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MERIDA, A.; KHARCHI, F. Pozzolan concrete durability on sulphate attack. **Procedia Engineering**, v. 114, p. 832-837, 2015. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.035.

MOHAMMADHOSSEINI, H.; AWAL, A. S. M. A.; YATIM, J. B. M. The impact resistance and mechanical properties of concrete reinforced with waste polypropylene carpet fibres. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 147-157, jul. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.109.

MOKTARZADEH, A.; FRENCH, C. Mechanical properties of high strength concrete with consideration for precast applications. **ACI Materials Journal**, v. 97, n. 2, p. 136-147, mar. 2000.

MOLAY, T. G. G.; LEROY, M. N. L.; FIDELE, T.; FRANCK, H. G.; BIENVENU, N. J-M. Mechanical and physical performances of concretes made from crushed sands of diferente geological nature subjected to high temperatures. **Engeneering Science and Technology - an International Jornal**, p. 1-9, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.jestch.2019.02.007.

NAZRI, F. M.; JAYA, R. P.; BAKAR, B. H. A.; AHMADI, R. Fire resistance of ultra-high performance fibre reinforced concrete due to heating and cooling. *In*: International Unimas Stem Engineering Conference - ENCON, 9. 2016, Sarawak. **Web of conferences...** Sarawak: MANTEC, 2016, v. 87, p. 1-9. DOI: 10.1051/matecconf/20178701021.

NEOMATEX. **Firex: microfibra de polipropileno anti-spalling**. Taboão da Serra, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2016.

OLUTOGE, F. A.; ADESINA, P. A. Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the strength and durability properties of concrete.

Construction and Building Materials, v. 196, p. 386-394, jan. 2019.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.138.

OZAWA, M.; MORIMOTO, H. Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 83-92, nov. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.068.

PENG, G.; HUANG, Z-S. Change in microstructure of hardened cement paste subjected to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 593-599, abr. 2008. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.002.

PLIYA, P.; BEAUCOUR, A.-L.; NOUMOWÉ, A. Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 1926-1934, abr. 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.064.

PLIZZARI, G.; MINDESS, S. Fiber-reinforced concrete. Developments in the **Formulation and reinforcement of concrete (second edition)**, p. 257-287, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-08-102616-8.00011-3.

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2017. Disponível em: <https://www.R-project.org/>

REAL, S.; GOMES, M. G.; RODRIGUES, A. M.; BOGAS, J.; A. Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings. **Construction and Building Materials**, v. 121, p. 460-470, set. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.018.

RIDING, K. A.; POOLE, J. L.; FOLLIARD, K. J.; JUENGER, M. C. G.; SCHINDLER, A. K. Modeling hydration of cementitious systems. **American Concrete Institute**, v. 109, n. 2, p. 225-234, dez. 2012.

RILEM. Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. **Materials and Structures**, v. 33, p. 603-611, 2000.

_____. RILEM 129: test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - compressive strength for service and accident conditions. **Materials and Structures**, v. 28, p. 410-414, 1995.

ROSA, D. W. da. **Resistividade elétrica de concretos com diferentes teores de escória de alto forno e ativador químico**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

RUSSEL, H. G.; GRAYBEAL, B. A. Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report for the bridge community. **Federal Highway Administration**, McLean, jun. 2013.

ROSSIGNOLO, J. A. Effect of silica fume and SBR latex on the pasteaggregate interfacial transition zone. **Materials Research**, v. 10, n. 1, p. 83-86, 2007. DOI: 10.1590/S1516-14392007000100018

SALAS, A.; DELVASTO, S.; GUTIERREZ, R. M.; LANGE, D. Comparison of two processes for treating rice husk ash for use in high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 773-778, set. 2009. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.05.006.

SAWANT, R. M.; GHUGAL, Y. M.; KHAN, J. A. Evaluation of split tensile strength of high strength fiber reinforced concrete. **International Journal of Technical Research and Applications**, v. 3, n. 6, p. 243-247, nov. 2015.

SCHIAVON, M. A.; REDONDO, S. U. A.; YOSHIDA, I. V. P. Thermal and morphological characterization of basalt continuous fibers. **Cerâmica**, v. 53, n. 326, p. 212-217, jun. 2007. DOI: 10.1590/S0366-69132007000200017.

SEGUL, O. Use of electrical resistivity as an indicator of durability. **Construction and Building Materials**, v. 73, p. 434-441, dez. 2014. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.077.

SEGUL, O.; GJORV, O. E. Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. **ACI Materials Journal**, v. 105, n. 6, p. 541-547, nov. 2008.

SENSU. **Condutivímetro térmico**. Antônio Carlos, 2018.

SERRANO, R.; COBO, A.; PRIETO, M. I.; GONZÁLES, M. N. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. **Construction and Building Materials**, Madrid, v. 122, p. 302-309, set. 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055.

SILVA, F. G. da. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. 2006. 236f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais)- Universidade do São Paulo, São Carlos, 2006.

SOTO-IZQUIERDO, I.; ANTONIO-RAMALHO, M. Use of residual powder obtained from organic waste to partially replace cement in concrete. **Dyna**, v. 83, n. 195, 2016; p. 147-155. DOI: 10.15446/dyna.v83n195.44725.

STEINDL, F. R.; BALDERMANN, A.; GALAN, I.; SAKOPARNIG, M.; BRIENDL, L.; DIETZEL, M.; MITTERMAYR, F. Chemical resistance of eco-concrete - experimental approach on Ca-leaching and sulphate attack. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 55-68, out. 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.189.

TUAN, N. V.; YE, G.; BREUGEL, K. V.; FRAAIJ, A. L. A.; DAI, D. The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 4, p. 2030-2035, abr. 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia**, v. 2, São Paulo: IBRACON, 2011, p. 1283-1325.

VASCONCELOS, A. R. B.; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, P. 77-90, jan/mar. 2010. DOI: 10.1590/S1678-86212010000100009.

XIAO, J.; KONIG, G. Study on concrete at high temperature in China - an overview. **Fire Safety Journal**, v. 39, n. 1, p. 89-103, fev. 2004. DOI: 10.1016/S0379-7112(03)00093-6.

XIONG, M.; LIEW, J. Y. Spalling behavior and residual resistance of fibre reinforced Ultra-High Performance concrete after exposure to high temperatures. **Materiales de construccion**, v. 65, n. 320, p. 1-10, out. 2015. DOI: 10.3989/mc.2015.00715.

WANG, D.; JU, Y.; SHEN, H.; XU, L. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. **Construction and Building Materials**, China, v. 197, p. 464-473, fev. 2019. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.07.029.

WU, B.; SU, X.P.; LI, H.; YUAN, J. Effect of high temperature on residual properties of confined and unconfined high-strength concrete. **ACI Materials Journal**, v. 99, n. 4, p. 399-407, jul. 2002.

YERMAK, N.; PLIYA, P.; BEAUCOUR, A.-L.; SIMON, A.; NOUMOWÉ, A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 240-250, fev. 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120.

YOUNG, B. A.; HALL, A.; PILON, L. GUPTA, P. SANT, G. Can the compressive strength of concrete be estimated from knowledge of the mixture proportions?: New insights from statistical analysis and machine learning methods. **Cement and Concrete Research**, v. 115, jan. 2019; p. 379-388. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.09.006.

ZAIN, M. F. M.; MAHMUD, H. B.; ILHAM, A.; FAIZAL, M. Prediction of splitting tensile strenght of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1251-1258, ago. 2002. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00768-8.