

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E
INFRAESTRUTURA**

Alessandro Simas Franchetto

**INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E
PROPRIEDADES RESIDUAIS DE CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Porto Alegre
agosto de 2022

ALESSANDRO SIMAS FRANCHETTO

**INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E
PROPRIEDADES RESIDUAIS DE CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof^ª. Dra. Ângela Gaio Graeff

Banca Examinadora:
Prof^º. PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Prof^ª. Dr^ª. Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Prof^º. Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima
Prof^º. Dr. Jacinto Manuel Antunes de Almeida

Porto Alegre
agosto de 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Franchetto, Alessandro Simas
Investigação das Características Físicas e
Propriedades Residuais de Concretos Autoadensáveis
Expostos a Altas Temperaturas / Alessandro Simas
Franchetto. -- 2022.
238 f.
Orientadora: Ângela Gaio Graeff.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Concreto. 2. Concreto autoadensável. 3. Altas
temperaturas. 4. Propriedades residuais. 5. Spalling.
I. Gaio Graeff, Ângela, orient. II. Título.

ALESSANDRO SIMAS FRANCHETTO

**INVESTIGAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E
PROPRIEDADES RESIDUAIS DE CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS EXPOSTOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Área de Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 07 de outubro de 2022.

Prof^a Ângela Gaio Graeff
Ph.D. pela University of Sheffield, UK
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)
Ph.D. pela University of Leeds, UK

Prof. Denise Carpena Coitinho Dal Molin (UFRGS)
Dr^a. pela Universidade de São Paulo, BR

Prof. Rogério Cattelan Antochaves de Lima (UFSC)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR

Prof. Jacinto Manuel Antunes de Almeida (PUCRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, BR

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por permitir o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço à minha esposa, Débora Kwirant Franchetto, aos meus pais, Alessandro Franchetto e Rosimari Simas Franchetto, à minha irmã, Anna Giulia Simas Franchetto e à minha nonna, Eda Terezinha Lonardi Franchetto, por todo o amor e apoio.

Agradeço à minha orientadora Ângela Gaio Graeff, por me receber como orientando, pela orientação, disponibilidade, atenção e conhecimento transmitido.

Agradeço ao Prof^o João Ricardo Masuero, meu orientador na graduação, que me incentivou a iniciar o mestrado e também por me auxiliar nas análises estatísticas.

Agradeço à Prof^a Denise Dal Molin pelo apoio e conhecimento que tanto colaborou com o desenvolvimento dos concretos autoadensáveis durante a pesquisa.

Agradeço aos professores Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Jacinto Manuel Antunes de Almeida que contribuíram com este trabalho por meio da banca de qualificação e da banca examinadora.

Agradeço também ao Lucas Reginato pelo conhecimento compartilhado e auxílio na realização de ensaios.

Agradeço à família LEME. Agradeço aos colegas que contribuíram com a pesquisa, Adriano Rodrigues da Silva, Carine Molz, Tobias Ottoni, Danielle Airão Barros, Carolina Dal Agnol Dalazen, Luiz Henrique Tirado.

Agradeço ao Edgar Wallace Pereira Lucas e ao José Orvandır por todo o apoio laboratorial.

Agradeço ao Alvaro Sanchis pela solicitude sempre que se fez necessária instrução em relação à programação ou à manutenção do forno.

Agradeço à equipe do Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER/UFRGS) pela realização dos ensaios de DR-X, em especial à Dr^a Márcia Machado e à Dr^a Annelise Kopp Alves.

Agradeço às empresas que doaram materiais para realização da pesquisa: GCP Applied Technologies, agradecimento à Danila Ferraz; JBL Distribuidora de Cimento, agradecimento

ao Batista; Areal Sul, agradecimento ao João Leonardo e à Miriam Beatriz; Pedreira Vila Rica, agradecimento ao Giancarlo Rigon.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

RESUMO

FRANCHETTO, A. S. **Investigação das características físicas e propriedades residuais de concretos autoadensáveis expostos a altas temperaturas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

O concreto autoadensável é um material cimentício com alta capacidade de fluir e preencher completamente as fôrmas apenas com seu peso próprio, sem necessidade de vibração, compactação ou qualquer tipo de influência externa. Este concreto vem sendo cada vez mais utilizado não apenas em obras especiais, mas também em edificações residenciais e comerciais, que devem atender a requisitos de resistência ao fogo. Embora os efeitos das altas temperaturas sobre os concretos convencionais tenham sido amplamente estudados, ainda há pouca investigação sobre os efeitos das altas temperaturas sobre os concretos autoadensáveis. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo estudar os efeitos da exposição a altas temperaturas sobre as características físicas e propriedades mecânicas residuais de diferentes famílias de concretos autoadensáveis. Foram produzidos três concretos, um convencional e dois autoadensáveis, três traços para cada um deles e mantidas as relações água/cimento, de 0,45, 0,59 e 0,76. Os corpos de prova foram expostos a altas temperaturas (200°C, 400°C, 600°C, 800°C e 1000°C), a taxa de aquecimento adotada foi de 1°C/min. Foram avaliadas a resistência à compressão, módulo de elasticidade, perda de massa, avaliação visual de cor e *spalling*, velocidade de pulso ultrassônico (VPU) e difração de Raios-X (DRX). Os resultados indicam que, desde que tomadas precauções para impedir a ocorrência de *spalling*, o comportamento dos concretos autoadensáveis é semelhante ao comportamento do concreto convencional de referência.

Palavras-chave: Concreto autoadensável; altas temperaturas; *spalling*.

ABSTRACT

FRANCHETTO, A. S. **Investigação das características físicas e propriedades residuais de concretos autoadensáveis expostos a altas temperaturas.** 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, UFRGS, Porto Alegre.

Self-compacting concrete is a cementitious material with a high capacity to flow and completely fill the formwork only with its own weight, without the need for vibration, compaction or any type of external influence. This concrete has been increasingly used not only in special works, but also in residential and commercial buildings, which must meet fire resistance requirements. Although the effects of high temperatures on conventional concretes have been extensively studied, there is still few research on the effects of high temperatures on self-compacting concretes. In this context, this work aimed to study the effects of exposure to high temperatures on the physical characteristics and residual mechanical properties of different families of self-compacting concrete. Three concretes were produced, one conventional and two self-compacting, three mixes for each of them and maintaining the water/cement ratios of 0.45, 0.59 and 0.76. The specimens were exposed to high temperatures (200°C, 400°C, 600°C, 800°C and 1000°C), the heating rate adopted was 1°C/min. Compressive strength, elastic modulus, mass loss, visual evaluation of color and spalling, ultrasonic pulse velocity (VPU) and X-ray diffraction (XRD) were evaluated. The results indicate that, as long as precautions are taken to prevent spalling, the behavior of self-compacting concrete is similar to the behavior of conventional reference concrete.

Keywords: Self-compacting concrete, elevated temperatures, spalling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição global das publicações que relacionam concretos autoadensáveis e altas temperaturas.....	30
Figura 2: Publicações que relacionam concretos autoadensáveis e altas temperaturas por ano de publicação.....	31
Figura 3: Número de publicações que relacionam concretos autoadensáveis e altas temperaturas x taxas de aquecimento	32
Figura 4: Evolução das fases cristalinas de cimentos durante o aquecimento: teor normal de C3A	35
Figura 5: Estudo da estabilidade térmica e das transformações físico-químicas de diversos agregados em função da temperatura	36
Figura 6: Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida ..	39
Figura 7: Corpos de prova de CAA que sofreram spalling a 600°C.....	43
Figura 8: Corpos de prova de CC que sofreram spalling a 500°C.....	44
Figura 9: Rampas de aquecimento adotadas por diferentes autores	45
Figura 10: Curva de composição granulométrica para agregado graúdo	52
Figura 11: Curva de composição granulométrica para agregado miúdo – areia regular.....	54
Figura 12: Curva de composição granulométrica para agregado miúdo – areia fina	56
Figura 13: Organograma da etapa experimental	58
Figura 14: Forno Elétrico (mufla)	58
Figura 15: Organograma do Projeto de Pesquisa.....	60
Figura 16: Identificação do tratamento dado aos CPs para cada um dos traços.	63
Figura 17: Equipamentos para realização de slump-flow test	69
Figura 18: (a) CAA sem segregação; (b) CAA com segregação	69
Figura 19: T50 Test (Slump-flow Time).....	71
Figura 20: Ensaio do módulo estático de elasticidade	73
Figura 21: Investigação com Difração de Raios-X (a) CP referência com metacaulim (b) CP Aquecido com metacaulim	79
Figura 22: Vistas do corpo de prova (medidas em milímetros) com tubo de cobre e representação 3D com termopar inserido.....	82
Figura 23: Concretagem de corpos de prova com tubos de cobre	83

Figura 24: Variação de massa nos corpos de prova utilizados para calibração do forno 84	
Figura 25: Comparativo entre evolução teórica e real da temperatura do forno 86	
Figura 26: Evolução da temperatura do forno versus temperatura no interior dos corpos de prova	87
Figura 27: Resistência potencial à compressão na etapa de dosagem	96
Figura 28: Resistência potencial à compressão dos CC na etapa de dosagem ...	96
Figura 29: Resistência potencial à compressão dos CAA VMA na etapa de dosagem.....	97
Figura 30: Resistência potencial à compressão dos CAA NP na etapa de dosagem.....	97
Figura 31: Curva de dosagem para o CC	98
Figura 32: Curva de dosagem para o CAA VMA.....	99
Figura 33: Curva de dosagem para o CAA NP	100
Figura 34: Imagens do Slump Flow Test dos CAA	103
Figura 35: Massa específica média do concreto no estado fresco	104
Figura 36: Massa específica dos concretos sazoados em função da idade	105
Figura 37: Massa específica normalizada dos concretos sazoados em função da idade	106
Figura 38: Relação entre massa específica e resistência à compressão aos 28 dias	107
Figura 39: Variação de massa nos concretos que foram secos em estufa.....	108
Figura 40: Variação de massa nos concretos que foram aquecidos posteriormente	110
Figura 41: Massa residual após aquecimentos – normalizada.....	112
Figura 42: Comparação entre variação de massa: aquecimentos x teor de umidade	113
Figura 43: Gráfico da velocidade de pulso ultrassônico em função da temperatura de exposição - todos os traços.....	116
Figura 44: Gráfico da velocidade em função da temperatura de exposição – traços 1:3,5	117
Figura 45: Gráfico da velocidade em função da temperatura de exposição - traços 1:5	118
Figura 46: Gráfico da velocidade em função da temperatura de exposição - traços 1:6,5	119
Figura 47: Resistência média à compressão após aquecimento	122

Figura 48: Curvas dos fatores de redução da resistência em função da temperatura.....	124
Figura 49: Resistência x velocidade de pulso ultrassônico.....	130
Figura 50: Módulos de elasticidade normalizados após aquecimentos	134
Figura 51: Módulos de elasticidade após aquecimentos e taxas de redução	134
Figura 52: Curvas de evolução de módulo de elasticidade e de resistência à compressão em função da temperatura	135
Figura 53: Módulos de elasticidade – NBR 8522 x NBR 6118.....	142
Figura 54: Difratomogramas do CC 1:5 em função da temperatura.....	144
Figura 55: Difratomogramas do CA VMA 1:5 em função da temperatura	145
Figura 56: Difratomogramas do CA NP 1:5 em função da temperatura	146
Figura 57: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade	151
Figura 58: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade normalizados	152
Figura 59: Correlação entre a VPU e a resistência à compressão.....	153
Figura 60: Correlação entre a VPU e a resistência à compressão normalizadas	154
Figura 61: Correlação entre a VPU e o módulo de elasticidade	155
Figura 62: Correlação entre a VPU e o módulo de elasticidade normalizados	156
Figura 63: Variação de cores do concreto.....	157
Figura 64: Fissuras CC 1:6,5.....	158
Figura 65: Fissuras CAA VMA 1:3,5	158
Figura 66: Fissuras CAA VMA 1:5	159
Figura 67: Fissuras CAA VMA 1:6,5	159
Figura 68: Fissuras CAA NP 1:3,5	160
Figura 69: Fissuras CAA NP 1:5	160
Figura 70: Fissuras CAA NP 1:6,5	161
Figura 71: Corpos de prova não sazoados (CC e CAA VMA).....	163
Figura 72: Corpos de prova após aquecimento/spalling (CC e CAA VMA) ...	164
Figura 73: Corpos de prova não sazoados (CAA NP)	165
Figura 74: Corpos de prova após aquecimento/spalling (CAA NP).....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Revisão sistemática de artigos sobre CAA exposto a altas temperaturas	26
Tabela 2: Transformações sofridas por pastas de cimento durante aquecimento 34	
Tabela 3: Revisão sistemática de ocorrência de spalling em artigos sobre CAA em altas temperaturas	42
Tabela 4: Propriedades físico-químicas do cimento	49
Tabela 5: Composição e informação sobre os componentes do cimento	49
Tabela 6: Ensaio químicos - Cimento Nacional	50
Tabela 7: Ensaio físicos - Cimento Nacional	50
Tabela 8: Ensaio mecânicos - Cimento Nacional.....	50
Tabela 9: Composição granulométrica do agregado graúdo.....	51
Tabela 10: Densidade e absorção de água - agregado graúdo	52
Tabela 11: Granulometria do agregado miúdo – areia regular	53
Tabela 12: Densidade e absorção de água – areia regular	53
Tabela 13: Granulometria do agregado miúdo – areia fina	55
Tabela 14: Densidade e absorção de água – areia fina	55
Tabela 15: Taxa de aquecimento recomendada, máxima taxa de resfriamento e máximo período entre medições de temperatura da superfície do corpo de prova 59	
Tabela 16: Fatores controláveis e níveis para etapa de dosagem.....	62
Tabela 17: Fatores controláveis e níveis para pesquisa	62
Tabela 18: Dosagem do traço seco em massa de concreto convencional traço 1:5 66	
Tabela 19: Limites de resultados para o slump-flow test	70
Tabela 20: Classes de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre)	70
Tabela 21: Valores das relações $f_c, \theta f_c, k$ e $E_c, \theta E_c$ para concretos de massa específica normal.....	74
Tabela 22: Qualidade do concreto em função da VPU	76
Tabela 23: VPU – Equipamento de ultrassom	77
Tabela 24: VPU - Parâmetros do Sistema.....	78
Tabela 25: VPU - Outras Informações.....	78
Tabela 26: Traço em massa do CC 1:5 da etapa de calibração do forno	83

Tabela 27: Características do concreto da etapa de calibração do forno	84
Tabela 28: Tempos de homogeneização das temperaturas	88
Tabela 29: Traços unitários secos em massa	89
Tabela 30: Traço em massa CC 1:3,5 e CAA VMA 1:3,5	91
Tabela 31: Traço em massa CC 1:5 e CAA VMA 1:5	92
Tabela 32: Traço em massa CC 1:6,5 e CAA VMA 1:6,5	93
Tabela 33: Traço em massa CAA NP 1:3,5	93
Tabela 34: Traço em massa CAA NP 1:5	94
Tabela 35: Traço em massa CAA NP 1:6,5	94
Tabela 36: Consumo real dos materiais (kg/m ³) dos concretos produzidos	95
Tabela 37: Equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem	101
Tabela 38: Classificação no estado fresco	102
Tabela 39: Teor de umidade - pré-aquecimento	111
Tabela 40: Médias das velocidades (m/s) em função de traço para temperaturas de 20°C a 400°C	114
Tabela 41: Médias das velocidades (m/s) em função de traço para temperaturas de 600°C a 1000°C	115
Tabela 42: Médias normalizadas para velocidades de pulso ultrassônico	119
Tabela 43: Ultrassom – regressão: equações e R ²	120
Tabela 44: Fatores de redução da resistência em função da temperatura	123
Tabela 45: Análise ANOVA para fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura	125
Tabela 46: Comparação múltipla de médias - fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura – traço 1:3,5	126
Tabela 47: Comparação múltipla de médias - fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura – traço 1:5	127
Tabela 48: Comparação múltipla de médias - fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura – traço 1:6,5	128
Tabela 49: Módulo de elasticidade médio (GPa) - CC	131
Tabela 50: Módulo de elasticidade médio (GPa) - CAA VMA	131
Tabela 51: Módulo de elasticidade médio (GPa) - CAA NP	132
Tabela 52: Módulos de elasticidade normalizados	132
Tabela 53: Valores das relações f_c , θf_c , m e E_c , θE_c para concretos produzidos	

Tabela 54: Análise ANOVA para fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura - dados coletados em laboratório.....	137
Tabela 55: Análise ANOVA para fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura - reposição de dados excluídos.....	138
Tabela 56: Comparação múltipla de médias - fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura – traço 1:3,5	139
Tabela 57: Comparação múltipla de médias - fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura – traço 1:5	140
Tabela 58: Comparação múltipla de médias - fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura – traço 1:6,5	141

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ASTM – *American Society for Testing and Materials*;

CAA – Concreto autoadensável;

CAR – Concreto de alta resistência;

CBI - Swedish Cement and Concrete Research Institute;

CC – Concreto convencional;

CPs – corpos de prova;

CPV-ARI - Cimento Portland de alta resistência inicial;

C-S-H – silicatos de cálcio hidratados;

DRX – Difração de Raios-X;

EFNARC - European Federation Dedicated to Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems;

JRMCA - Japanese Ready-Mixed Concrete Association;

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS;

LCPC - Laboratory Central des Ponts et Chaussées;

LEME – Laboratório de Ensaio e Modelos Estruturais da UFRGS;

LVDT - Linear Variable Differential Transformer;

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura;

NBR – Norma Brasileira;

pH – potencial hidrogeniônico;

PP – Polipropileno;

PPGCI – Programa de Pós-Graduação Construção e Infraestrutura;

RILEM – The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures;

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

UR – Umidade relativa;

VPU – Velocidade de pulso ultrassônico;

VSI – Vertical Shaft Impact.

LISTA DE SÍMBOLOS

Abs – absorção de água;

$D_{m\acute{a}x}$ – diâmetro máximo;

$E_{c,\theta}$ – módulo de elasticidade do concreto submetido a diferentes temperaturas;

E_c – módulo de elasticidade do concreto em situação normal;

$E_{ci,i}$ – resultado individual de módulo de elasticidade ou módulo de deformação conforme NBR 8522 (ABNT 2017b);

$E_{ci,m}$ – média dos resultados individuais do módulo de elasticidade ($E_{ci,i}$), expressos com três algarismos significativos, em gigapascals (GPa);

E_{ci} – módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial;

$f_{c,k}$ – resistência característica à compressão do concreto em situação normal;

$f_{c,\theta}$ – resistência à compressão do concreto na temperatura θ ;

f_c – resistência à compressão do concreto;

f_{cm} – resistência média à compressão do concreto;

GPa – gigapascal;

kHz – quilohertz;

kN – kilonewton;

m³ – metro cúbico;

mm – milímetro;

MPa – megapascal;

nm – nanômetro;

R² - coeficiente de correlação;

V – volt;

Δ – variação;

μs – microssegundo.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	21
1.1	Considerações iniciais.....	21
1.2	Justificativa	22
1.3	Objetivos	32
1.4	Limitações do estudo	33
2	REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1	Comportamento do concreto convencional em altas temperaturas	34
2.2	Comportamento do CAA após altas temperaturas	37
2.2.1	Referencial teórico sobre comportamento do CAA em altas temperaturas 41	
2.2.2	Taxas de aquecimento para avaliação de concretos em altas temperaturas 45	
2.3	Pesquisas sobre concretos expostos a altas temperaturas desenvolvidas no LEME	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	Materiais	48
3.1.1	Aglomerante.....	48
3.1.2	Agregado graúdo.....	51
3.1.3	Agregado miúdo	52
3.1.4	Fino não pozolânico.....	54
3.1.5	Água.....	56
3.1.6	Aditivo superplastificante.....	56
3.1.7	Aditivo modificador de viscosidade	57
3.2	Programa experimental	57
3.2.1	Descrição da etapa preliminar	57
3.2.2	Projeto de pesquisa	60
3.3	Definição, moldagem e cura dos concretos	64
3.3.1	Definição dos traços.....	64
3.3.2	Método de dosagem.....	64
3.3.3	Determinação do teor de argamassa	65
3.3.4	Processo de mistura	66
3.3.5	Moldagem dos corpos de prova.....	67

3.3.6 Cura.....	67
3.3.7 Sazonamento.....	67
3.4 Caracterização no estado fresco.....	68
3.4.1 Classe de consistência do concreto convencional.....	68
3.4.2 Slump-flow Test (Slump-flow Spread).....	68
3.4.3 T50 Test (Slump-Flow Time).....	70
3.4.4 Massa específica no estado fresco.....	71
3.5 Caracterização no estado endurecido.....	72
3.5.1 Resistência à compressão.....	72
3.5.2 Módulo de elasticidade.....	72
3.5.3 Perda de massa.....	74
3.5.4 Avaliação visual de cor e <i>spalling</i>	75
3.5.5 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU).....	75
3.5.6 Difração de Raios-X (DR-X).....	78
4 ETAPA PRELIMINAR.....	81
4.1 Concretagem e sazonalimento.....	81
4.2 Aquecimento para calibração dos tempos de aquecimento.....	85
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS PARA O PROJETO PRINCIPAL DE PESQUISA.....	89
5.1 Dosagem.....	89
5.1.1 Traço seco em massa.....	90
5.1.2 Resistência à compressão.....	95
5.1.3 Curvas de dosagem.....	97
5.2 Estado fresco.....	101
5.2.1 Ensaios de caracterização no estado fresco.....	101
5.2.2 Massa específica no estado fresco.....	104
5.3 Estado endurecido.....	104
5.3.1 Massa específica no estado endurecido.....	104
5.3.2 Variação de massa e teor de umidade.....	107
5.3.3 Velocidades de Pulso Ultrassônico.....	113
5.3.4 Resistência à compressão após aquecimento.....	121
5.3.5 Módulo de elasticidade ambiente e após aquecimento.....	130
5.3.6 Difração de Raios-X (DRX).....	143

5.4	Correlação entre variáveis de resposta	150
5.4.1	Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade	150
5.4.2	Correlação entre VPU e resistência à compressão	152
5.4.3	Correlação entre VPU e módulo de elasticidade	154
5.5	Análise Qualitativa	156
5.5.1	Avaliação visual de cor e fissuras.....	156
5.5.2	Avaliação visual de <i>spalling</i>	161
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	168
6.1	Conclusões	168
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	170
	REFERÊNCIAS	172
	APÊNDICE A – Resultados de resistência à compressão - curva de dosagem	186
	APÊNDICE B – Estimativa da densidade do concreto no estado fresco	187
	APÊNDICE C – Massa do concreto no estado endurecido	188
	APÊNDICE D – Dimensões dos CPs	197
	APÊNDICE E – Densidade média no estado endurecido.....	200
	APÊNDICE F – Variação de massa – CPs secos em estufa	202
	APÊNDICE G – Variação de massa – CPs em câmara seca e aquecidos	203
	APÊNDICE H – Dados Ultrassom	212
	APÊNDICE I – Resultados de resistência à compressão.....	221
	APÊNDICE J – Dados módulo de elasticidade	224
	APÊNDICE K – Difratogramas dos traços 1:3,5 e 1:6,5.....	233

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o tema de pesquisa, bem como as considerações iniciais que abordam a atual realidade em relação ao tema. Em seguida justifica-se a importância da pesquisa no desenvolvimento da tecnologia de concretos e dentro da Segurança Contra Incêndio. Por fim, os objetivos são apresentados, bem como as limitações da dissertação.

1.1 Considerações iniciais

O concreto autoadensável (CAA) é um material relativamente novo, começou a ser desenvolvido em 1986 com o objetivo de ser um concreto durável que não dependesse da força de trabalho para garantir sua qualidade. Proposto por Okamura, esse concreto deveria preencher todos os espaços da fôrma sem necessidade de vibração, apenas pelo seu próprio peso. A primeira versão do CAA foi apresentada em 1988, no Japão, e utilizava apenas materiais já disponíveis e acessíveis no mercado (OKAMURA; OUCHI, 2003; OKAMURA; OUCHI, 1998; PATHAK; SIDDIQUE, 2012). A escassez de mão de obra qualificada disponível para lançamento, vibração e adensamento do concreto, fatores que impactam a qualidade das estruturas de concreto armado, foi um dos motivos que incentivaram o desenvolvimento deste concreto em território japonês.

O CAA é um material cimentício com alta capacidade de fluir e preencher completamente as fôrmas apenas com seu peso próprio, sem a necessidade de vibração, compactação ou qualquer tipo de influência externa (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; ASLANI; SAMALI, 2013; ANAND; GODWIN; ARULRAJ, 2016). Ainda segundo a definição da *European Federation Dedicated to Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*: concreto capaz de fluir com o peso próprio e preencher totalmente as formas, mesmo na presença de armadura densa, sem necessidade de vibração, mantendo-se homogêneo (EFNARC, 2002).

Uysal (2012) destaca que as propriedades únicas do concreto autoadensável geram vantagens técnicas e econômicas em virtude de sua aplicabilidade. Essa afirmação vem ao encontro de Tutikian e Dal Molin (2008), os quais destacam que o CAA não é apenas um tipo de concreto, senão uma tecnologia, a qual, além de novas propriedades, traz novas oportunidades.

Para que o concreto seja considerado autoadensável devem-se atingir três propriedades: fluidez, habilidade passante/coesão e resistência à segregação (EFNARC, 2002; TUTIKIAN, 2007; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). O concreto autoadensável ainda hoje conquista espaço, sendo utilizado não mais apenas em túneis, estruturas *off-shore*, *decks* de pontes, fundações e reforços, mas ampliando seu uso em estruturas de edificações residenciais e comerciais.

1.2 Justificativa

Segundo Tutikian e Dal Molin (2021), o CAA é uma das áreas de tecnologia do concreto com maior potencial de desenvolvimento. Os autores consideram não apenas um tipo de concreto, mas uma tecnologia que proporciona diferentes propriedades, trabalhabilidade e estabilidade, e gera novas oportunidades ao ser aplicada corretamente. Frisam que para isso deve-se avaliar a estrutura holisticamente, buscando-se a otimização da arquitetura em conjunto com as possibilidades do processo construtivo.

Embora o interesse pelo CAA venha crescendo no Brasil nos últimos anos, não apenas nas indústrias de pré-fabricados e obras especiais, mas também em obras correntes, a utilização deste ainda é muito pequena em relação ao seu potencial de utilização. Destacando-se como um dos principais motivos o desconhecimento dos profissionais em relação a esse concreto. Embora estudem-se as propriedades mecânicas, durabilidade e inserção de materiais locais, a dosagem, fator que influencia todos os outros, ainda é pouco estudada (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2021).

Domone (2006) analisou 68 estudos de caso de aplicações de concreto autoadensável, publicados entre 1993 e 2003, período de disseminação do uso CAA em muitos países. Foram relatados apenas 3 casos de aplicação de CAA na América do Sul, todos na Argentina em 2002. Destaca-se ainda a maior aplicação dos CAA na indústria de pré-fabricados, devido à maior sensibilidade do traço em função da utilização de aditivos, e outras variações que são mais fáceis controlar em ambiente industrial. Entre os motivos também estão o maior controle de qualidade e facilidade de descarte de peça pré-fabricada no caso de falhas, assim os custos justificam-se para a indústria, dada a possibilidade de se produzirem concretos autoadensáveis mais facilmente com maiores resistências, essa indústria também possui melhor controle dos processos e consegue avaliar mais facilmente seus custos (TUTIKIAN, 2004).

O concreto autoadensável vem sendo cada vez mais utilizado não apenas em obras industriais, mas também em edificações de uso comercial e residencial (SIDERIS, 2007; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008), que devem atender a requisitos específicos de resistência ao fogo. Há, entretanto, uma lacuna considerável de conhecimento em relação ao seu comportamento quando exposto a temperaturas elevadas. Além de pouca quantidade de informações e pesquisas sobre o tema, a correlação entre os resultados existentes é dificultada pela variabilidade de traços estudados.

Os concretos autoadensáveis podem ser produzidos pelos mais diversos métodos de dosagem, como: IPT/EPUSP, *Japanese Ready-Mixed Concrete Association (JRMCA)*, *Laboratory Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*, *Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI)*, Método de Okamura (1995), Método de Gomes (2002), Método de Su *et al.* (2001), Método Tutikian (2004), Método de Tutikian e Dal Molin (2007), entre outros. Dentro dessa perspectiva podem-se variar no tocante aos materiais: o tipo e quantidade de cimento, de agregado graúdo, de agregado miúdo, de finos (pozolânicos e não pozolânicos), de aditivo superplastificante, de aditivo modificador de viscosidade (VMA), de água e relação água/cimento, além de serem possíveis variações granulométricas dos agregados a fim de se obter um melhor empacotamento.

Enquanto os efeitos da temperatura sobre o concreto convencional (CC) têm sido amplamente investigados nas últimas décadas e vários estudos foram dedicados à investigação do *spalling* do concreto autoadensável quando exposto ao fogo, apenas recentemente tem-se dado a devida atenção às propriedades mecânicas do CAA, sejam elas em altas temperaturas “*hot*” *properties* (propriedades no estado quente) ou após resfriamento “*residual*” *properties* (propriedades residuais) (BAMONTE; GAMBAROVA, 2012).

Um exemplo da falta de informações e critérios normativos referentes ao concreto autoadensável em situação de incêndio é a não existência de recomendações específicas na NBR 15200 (ABNT, 2012). A Norma deixa claro em seu escopo que se aplica a estruturas de concretos normais, destacando em seu texto que o fator de redução da resistência do concreto apresentado nas Curvas de Perda de Resistência é recomendado para concretos com agregados predominantemente silicosos, o que prejudica ainda mais sua aplicação.

Segundo Noumowé (2006) alertou à época, com difusão do uso do CAA o risco de exposição ao fogo aumenta. Deve-se por esse motivo intensificarem-se as investigações do comportamento desse novo material quando exposto ao fogo e a altas temperaturas. Annerel *et al.* (2007) e ainda Aslani e Samali (2013) anos depois chamavam atenção para a necessidade de se estudar o comportamento do CAA exposto a altas temperaturas, visto que essa exposição gera degradação do material, perda de resistência, fissuras e *spalling* sob determinadas condições.

O efeito das altas temperaturas tem sido amplamente estudado, de uma forma geral, para concretos tradicionais ou concretos de alta resistência (CAR). Os poucos estudos sobre CAA exposto a altas temperaturas mostram concomitantemente uma diminuição da resistência e elevação do risco de *spalling*, ou então um comportamento similar ao do concreto convencional. *Spalling* pode ser definido como um fenômeno no qual a superfície do concreto escama e em seguida se desprende da estrutura, potencialmente de maneira explosiva em altas temperaturas (QADI *et al.*, 2012).

Segundo Hertz (2003) o *spalling* é causado pelo aumento da poropressão durante o aquecimento do concreto. A pressão é gerada pelo vapor de água durante a exposição ao calor, sendo tanto maior quanto maior a dificuldade do vapor deixar o interior do material, efeito que tem influência direta da menor porosidade dos concretos de maior resistência.

Sendo assim existe a necessidade de se estudar o comportamento do CAA submetido ao fogo e altas temperaturas, tanto em relação ao deslocamento (*spalling*) e deslocamento explosivo, quanto às propriedades residuais do material. Sendo estas últimas o objeto de estudo desta pesquisa.

Concretos autoadensáveis dosados com técnicas antigas eram usualmente produzidos com mais cimento e adições. O uso de aditivos possibilita menores relações água/cimento quando comparados com concretos convencionais. Isso resulta em maiores resistências dos CAA quando comparados aos CC, bem como poros mais finos, um fator considerado crítico para o comportamento do concreto sob elevadas temperaturas (SIDERIS, 2007). Os Métodos de Dosagem de CAA evoluíram, os mais recentes, aliados aos materiais disponíveis atualmente, possibilitam produzir Concretos Autoadensáveis sem a necessidade de maior consumo de

cimento e mesmo sem a necessidade de adições que substituam finos, gerando diferentes famílias de CAA, cada uma delas com características próprias.

Embora existam pesquisas com contribuições consideráveis em relação ao comportamento de concretos expostos a altas temperaturas, no Brasil ainda pode-se considerar esse campo incipiente. Some-se a isso o fato da tecnologia do concreto ter evoluído muito nos últimos anos, alterando suas características bem como seu comportamento sob certas condições de exposição (KIRCCHOF, 2010). Em relação ao Concreto Autoadensável essa evolução e alteração das características é ainda mais significativa em função de ser um material mais recente que se atualiza à medida que são desenvolvidos novos métodos de dosagem e aditivos mais modernos. Outro fator que deve ser destacado é que o termo “Concreto Autoadensável” não se restringe a apenas um concreto, mas a um conjunto de concretos que possuem as características necessárias para serem classificados como tais, embora essas características possam ser atingidas por meio de diferentes técnicas. As três grandes famílias são:

- Concretos Autoadensáveis por Substituição por Finos Não Pozolânicos;
- Concretos Autoadensáveis por Substituição por Finos Pozolânicos;
- Concreto Autoadensável com Aditivo Modificador de Viscosidade.

Embora haja uma compreensão geral dos mecanismos de degradação do concreto submetido a altas temperaturas, tomadas as particularidades do CAA e a necessidade de se determinar com maior precisão os fatores que influenciam sua degradação, a maneira mais eficaz de se investigar a resistência do material ao fogo é por meio de ensaios (JANSSON; BOSTRÖM, 2013).

Essa investigação é de suma importância, visto que, segundo Lima (2005), após a maioria dos incêndios a estrutura não entra em colapso, fazendo necessária uma avaliação da capacidade portante residual, a qual deve ser realizada com cuidado, dado que sua conclusão implica na demolição ou recuperação de elementos ou da estrutura como um todo. Para isso é necessário ter conhecimento dos danos que as altas temperaturas causam ao CAA, sua influência na resistência residual, módulo de elasticidade residual e comportamento do material.

Realizou-se uma pesquisa bibliográfica com o objetivo de listar e identificar variações entre artigos que relatassem estudos de concretos autoadensáveis submetidos a altas temperaturas.

Entre as principais variações estão as relações água/cimento, formatos dos corpos de prova, taxas de aquecimento, temperaturas máximas, períodos de homogeneização da temperatura do material na temperatura alvo, teores de argamassa, uso ou não de fibras e registro de ocorrência ou métodos adotados para evitar a ocorrência de *spalling*. O compilado de autores e algumas variáveis por eles adotadas está apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Revisão sistemática de artigos sobre CAA exposto a altas temperaturas

Autores	País dos autores	a/c	Corpo de Prova	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura Máxima (°C)	Período de Homogeneização (h)
Alhasanat <i>et al.</i> (2016)	Jordânia	0,32	cilíndrico	5 a 10	600	4
Ali (2011)	Jordânia	0,35 e 0,36	cilíndrico e prismático	2	800	2
Al-Kadi <i>et al.</i> (2015)	Jordânia e Malásia	0,32	cilíndrico	-	600	-
Al-Kadi <i>et al.</i> (2016)	Jordânia	0,32	cilíndrico e prismático	-	600	-
Al-Lami (2017)	Jordânia	0,38 a 0,44	cilíndrico e prismático	70	700	-
Anagnostopoulos <i>et al.</i> (2008)	Grécia	0,50 a 0,56	cilíndrico e prismático	10	600	1
Anand <i>et al.</i> (2016)	Índia	0,33 a 0,49	cilíndrico e prismático	curva própria	900	-
Anand <i>et al.</i> (2013)	Índia	0,30 a 0,39	prismático	curva própria	900	1,5
Anand <i>et al.</i> (2014)	Índia	0,30 a 0,39	cilíndrico	curva própria	900	-
Annerel e Taerwe (2010)	Bélgica	0,47 a 0,48	cilíndrico	5	500	12,5
Annerel e Taerwe (2012)	Bélgica	0,47 a 0,48	cilíndrico	5	400	-
Annerel <i>et al.</i> (2007)	Bélgica	0,47 a 0,48	prismático	3,5	550	12,5
Aslani e Kelin (2018)	Australia	0,45	cilíndrico	curva própria	900	1

continua

continuação

Autores	País dos autores	a/c	Corpo de Prova	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura Máxima (°C)	Período de Homogeneização (h)
Aslani e Ma (2018)	Austrália	0,45	cilíndrico	curva própria	900	1
Aslani e Samali (2013)	Austrália	-	-	-	800	-
Aslani <i>et al.</i> (2019)	Austrália	0,45	cilíndrico	5	900	-
Azarijafari <i>et al.</i> (2019)	Irã e Austrália	0,34	prismático	1	700	1
Bakhtiyari <i>et al.</i> (2011)	Irã	0,51 a 0,56	cilíndrico e prismático	10	1000	2
Bamonte e Gambarova (2012)	Itália	0,33 a 0,5	cilíndrico	1 e 2	600	-
Boström e Jansson (2007)	Suécia	0,4 a 0,71	prismático	ISO 834	-	-
Boström e Larsen (2006)	Suécia e Noruega	0,38 a 0,55	prismático	-	800	-
Boström <i>et al.</i> (2007)	Suécia	0,30 a 0,55	prismático	curva própria e ISO 834	1300	-
Chung <i>et al.</i> (2015)	Coréia do Sul	0,38	prismático	ISO 834	-	-
Dehn <i>et al.</i> (2007)	Alemanha	0,37	prismático	curva própria	1300	2
Ding <i>et al.</i> (2011)	China e Portugal	0,37	prismático	6	900	3
Ding <i>et al.</i> (2014)	China	0,41	prismático	ISO 834	600	-
Ding <i>et al.</i> (2016)	China e Portugal	0,32	prismático	ISO 834	600	1,5
Fares <i>et al.</i> (2009)	França	0,54 a 0,61	cilíndrico e prismático	1	600	1
Fares <i>et al.</i> (2010)	França	0,54 a 0,61	cilíndrico e prismático	1	600	1
Fares <i>et al.</i> (2011)	França	0,39 a 0,54	-	1	600	1
Fares <i>et al.</i> (2015)	França	0,35	cilíndrico e prismático	1 e ISO 843	400 e 600	2
Guler <i>et al.</i> (2021)	Turquia e Canadá	0,48	prismático	-	800	-

continua

continuação

Autores	País dos autores	a/c	Corpo de Prova	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura Máxima (°C)	Período de Homogeneização (h)
Haddad <i>et al.</i> (2013)	Jordânia	0,4 a 0,5	cilíndrico e prismático	curva própria	600	-
Helal e Heiza (2010)	Egito	0,36 a 0,45	cilíndrico e prismático	-	600	2
Jani <i>et al.</i> (2020)	Malásia	0,34	prismático	HC	1100	-
Jansson e Boström (2007)	Suécia	-	-	-	-	-
Jansson e Boström (2009)	Suécia	0,4	prismático	HC	-	-
Jansson e Boström (2013)	Suécia	0,4 a 0,65	prismático	STD e HC	-	-
Jin <i>et al.</i> (2007)	China	0,41	cilíndrico	5	800	-
Khaliq e Kodur (2011)	Estados Unidos	0,44	cilíndrico e prismático	2 e 5	800	-
Liu <i>et al.</i> (2008)	China	0,33 a 0,41	prismático	10	500	-
Lo Monte e Gambarova (2014)	Itália	0,33 e 0,5	cilíndrico e prismático	curva própria	750	-
Lu <i>et al.</i> (2009)	Austrália e China	0,32	prismático	-	várias	-
Lura e Terrasi (2014)	Suíça	0,29 a 0,31	prismático	ISO 834	-	-
Mahapatra e Barai (2019)	Índia	0,38	cilíndrico e prismático	-	600	1
Mujedu <i>et al.</i> (2021)	Malásia e Nigéria	0,5	prismático	2,7	1000	2
Muthusamy e Kolandasamy (2015)	Índia	0,33 a 0,37	prismático	2,5	800	1
Noumowé <i>et al.</i> (2006)	França	0,41	cilíndrico	0,5 e ISO 834	400 e 600	-
Pathak e Siddique (2012)	Índia	0,38 a 0,42	cilíndrico e prismático	1	300	1
Persson (2004)	Suécia	0,4 e 0,7	cilíndrico e prismático	4 e 8	800	0,5

continua

continuação

Autores	País dos autores	a/c	Corpo de Prova	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura Máxima (°C)	Período de Homogeneização (h)
Pistol <i>et al.</i> (2013)	Alemanha	0,3	cilíndrico	1	600	-
Qadi e Al-Zaidyeen (2014)	Jordânia	0,32	cilíndrico e prismático	5 a 10	600	-
Qadi <i>et al.</i> (2012)	Malásia e Jordânia	0,32	cilíndrico	-	600	-
Reinhardt e Stegmaier (2006)	Alemanha	0,33 a 0,71	cilíndrico	ISO 834	-	-
Ríos <i>et al.</i> (2018)	Espanha	0,2	cilíndrico	10	700	6, 24 e 48
Sadrmomtazi <i>et al.</i> (2020)	Irã	0,38	cilíndrico	5	600	2
Sideris (2007)	Grécia	0,45 a 0,6	cilíndrico e prismático	5	700	1
Sideris e Manita (2013)	Grécia	0,44 a 0,56	cilíndrico e prismático	5	600	1
Stegmaier e Reinhardt (2004)	Alemanha	0,33 a 0,71	prismático	ISO 4102	-	-
Tao <i>et al.</i> (2009)	China e Bélgica	0,33	cilíndrico	8	700	-
Tao <i>et al.</i> (2010)	China e Bélgica	0,28 e 0,64	cilíndrico	5	800	-
Tao <i>et al.</i> (2012)	China	0,41 e 0,64	cilíndrico	5, 10 e 15	600	-
Tao <i>et al.</i> (2012)	China e Bélgica	-	cilíndrico	5	800	-
Trezos e Sfikas (2013)	Grécia	0,36 a 0,56	prismático	curva própria	900	-
Uygunoğlu e Topçu (2009)	Turquia e Canadá	0,36 a 0,48	cilíndrico e prismático	5	100	-
Uysal e Tanyildizi (2012)	Turquia e Canadá	0,33 a 0,83	prismático	curva própria	800	-
Werner <i>et al.</i> (2016)	Alemanha	0,53	cilíndrico e prismático	ISO 834	-	-
Xargay <i>et al.</i> (2018)	Argentina	0,35	cilíndrico e prismático	10	600	3

continua

continuação

Autores	País dos autores	a/c	Corpo de Prova	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura Máxima (°C)	Período de Homogeneização (h)
Ye <i>et al.</i> (2005)	China, Bélgica e Holanda	0,33 a 0,48	-	10	950	-
Ye <i>et al.</i> (2009)	Bélgica e Holanda	-	prismático	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Os cinco países mais envolvidos nessas pesquisas são China, Jordânia, Bélgica, Suécia e Índia. No mapa apresentado na Figura 1 é possível identificar concentração de pesquisas na Europa, esse fato pode ser explicado pelo número de túneis rodoviários e ferroviários nesse continente, nos quais já ocorreram incêndios e onde a utilização de CAA teria vantagens. Conforme Boström e Larsen (2006), o CAA apresenta características apropriadas para o revestimento de túneis, como maior durabilidade, adensamento pelo peso próprio e capacidade de contornar obstáculos, tornando as moldagens *in situ* mais simples.



Figura 1: Distribuição global das publicações que relacionam concretos autoadensáveis e altas temperaturas

(fonte: elaborado pelo autor)

Outra avaliação importante para quem se interessa pelo tema é a variação do número de publicações entre 2004 e 2021, com alguns picos isolados, e atualmente em declínio injustificado, apresentando apenas 12 publicações desde 2017, conforme apresentado na Figura 2.

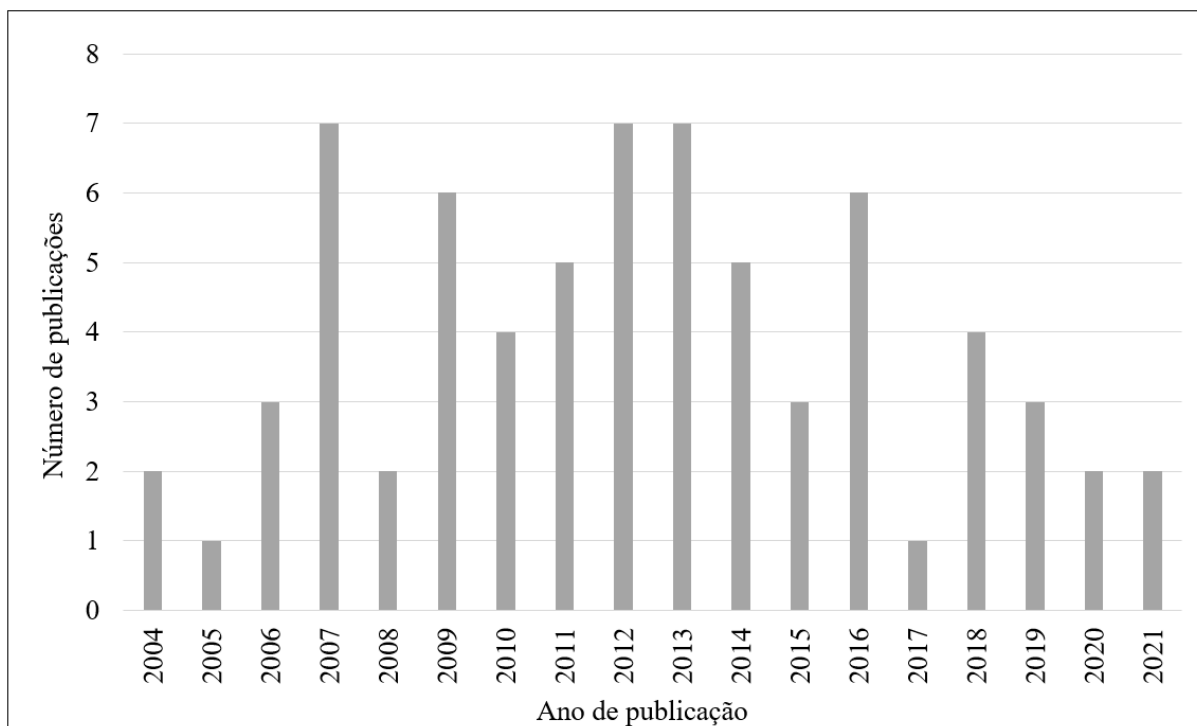


Figura 2: Publicações que relacionam concretos autoadensáveis e altas temperaturas por ano de publicação

(fonte: elaborado pelo autor)

As taxas de aquecimento, embora concentrem-se em $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e ISO 834, são bastante variáveis entre as publicações, o que pode ser observado na Figura 3. O número de publicações com taxa de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ foi alavancado pelos trabalhos de Fares *et al.* (2009, 2010, 2011, 2015), enquanto o número de curvas ISO 834 por autores como Boström e Jansson (2007). A taxa denominada “curva própria” geralmente são variações das curvas HC e ISO 834, que conforme relatos na bibliografia, são utilizadas por falta de capacidade dos equipamentos em atingir as taxas de aquecimento ou temperaturas mais elevadas das curvas originais.

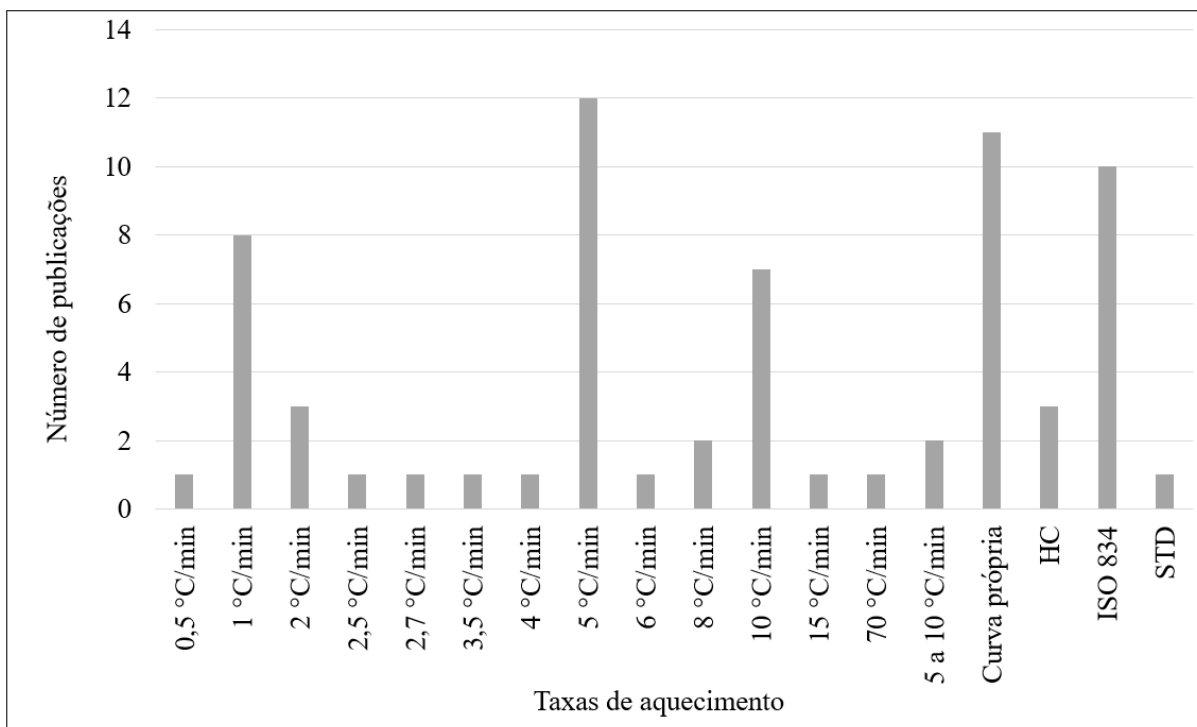


Figura 3: Número de publicações que relacionam concretos autoadensáveis e altas temperaturas x taxas de aquecimento

(fonte: elaborado pelo autor)

1.3 Objetivos

Considerando-se a explanação realizada nos itens anteriores, o objetivo principal da presente pesquisa é:

Estudar os efeitos da exposição a altas temperaturas sobre as características físicas e propriedades mecânicas residuais de diferentes famílias de concretos autoadensáveis.

Como objetivos secundários, apresentam-se:

- Avaliar a influência das altas temperaturas sobre as propriedades mecânicas residuais dos concretos – resistência à compressão simples e módulo de elasticidade.
- Avaliar a influência das altas temperaturas sobre a variação de massa e suscetibilidade ao *spalling* dos CAA.
- Avaliar a influência das altas temperaturas sobre as características microestruturais dos concretos por meio de UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) e DR-X (Difração por Raio-X).

- Gerar curvas de propriedades residuais para temperaturas verificadas na NBR 15200 (ABNT, 2012) a fim de que se possam comparar os resultados e analisar o prejuízo de se utilizar os fatores de redução da Figura 1 da referida Norma.

1.4 Limitações do estudo

Visto que os Concretos Autoadensáveis são um grupo abrangente de concretos, e as possibilidades de exposição a altas temperaturas são inúmeras, destacam-se algumas limitações desta pesquisa.

Dentro da tecnologia do concreto é possível gerar concretos autoadensáveis criando diferentes traços, desde que atendam às características necessárias para que o concreto tenha como característica a autoadensabilidade. Esta pesquisa desenvolveu e ensaiou um Concreto Convencional que serviu como referência e dois Concretos Autoadensáveis de tipos distintos, sendo que para cada concreto foram produzidos três traços com diferentes proporções cimento:agregados. Desta forma, é fundamental reforçar que os resultados obtidos para os traços produzidos não devem ser extrapolados para outros traços e mesmo sua comparação deve ser realizada com cautela.

A quantidade de corpos de prova e o tempo disponível para a pesquisa também foram fatores limitantes. Porém, a quantidade de temperaturas máximas que foram a que os concretos foram expostos permite criar uma curva que se aproxime bastante da apresentada na NBR 15200 (ABNT, 2012), considerando-se a temperatura ambiente e temperaturas de 200°C a 1000°C adotando-se intervalos de 200°C.

O resfriamento não foi controlado por falta de equipamentos que possibilitem esse controle. Sendo assim, os corpos de prova foram resfriados ao ar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esse capítulo aborda uma breve revisão da literatura sobre concretos expostos a elevadas temperaturas. Primeiramente será apresentado o assunto em relação aos concretos convencionais, posteriormente será abordado o assunto com ênfase para os concretos autoadensáveis e suas especificidades.

2.1 Comportamento do concreto convencional em altas temperaturas

Conhecem-se as transformações ocorridas na matriz do concreto durante o aquecimento conforme mostra a Tabela 2. Essas transformações são associadas a alterações significativas nas propriedades macroestruturais para determinadas faixas de temperatura.

Tabela 2: Transformações sofridas por pastas de cimento durante aquecimento

Temperatura (°C)	Transformações
20-80	Processo de hidratação acelerado, com perda lenta de água capilar e redução das forças de coesão
100	Marco no aumento da permeabilidade à água
80-200	Aumento na taxa de perda d'água capilar e fisicamente combinada
80-850	Perda da água quimicamente combinada
150	Pico do primeiro estágio de decomposição do C-S-H
300+	Marco no aumento da porosidade e microfissuras
350	Decomposição de alguns tipos de agregados de rio
374	Ponto crítico da água, acima do qual não existe água livre
400-600	Dissociação do C-S-H em CaO e água
573	Transformação da fase α para β dos agregados quartzosos e ligeira expansão
550-600+	Marco no aumento dos efeitos térmicos
700+	Dissociação do CaCO ₃ em CaO e CO ₂ (pasta e agregados carbonáticos)
720	Segundo pico da decomposição do C-S-H em α -C ₂ S e β -CS
800	Modificação das ligações químicas, com substituição da estrutura hidráulica por uma estrutura cerâmica
1060	Começo da fusão de alguns constituintes

(fonte: adaptada de CASTELLOTE *et al.*, 2003, *apud* LIMA, 2005)

Pathak e Siddique (2012) afirmam que as variações de massa dos corpos de prova devem-se principalmente à desidratação da pasta de cimento. Também observaram perdas de massa menores para a faixa de temperatura ambiente até 200°C, comparadas ao perceptível aumento da perda de massa para temperaturas entre 200°C e 300°C. Fares *et al.* (2009) observaram pequena variação de massa da temperatura ambiente até 150°C, atribuindo-a à evaporação de água livre dos poros capilares, para a faixa de 150°C a 300°C também se constatou um aumento na taxa de perda de massa. Ao serem comparadas com os resultados de outros ensaios, como DR-X e MEV, é possível verificar quais as transformações estão associadas à variação de massa em cada faixa de temperatura.

A resistência mecânica dos concretos submetidos a altas temperaturas é alterada pelas transformações físicas e químicas que ocorrem não só na matriz cimentícia, como também nos agregados. Na Figura 4 é mostrada a variação das fases cristalinas em função da temperatura para concretos produzidos com cimentos de baixo teor de C_3A .

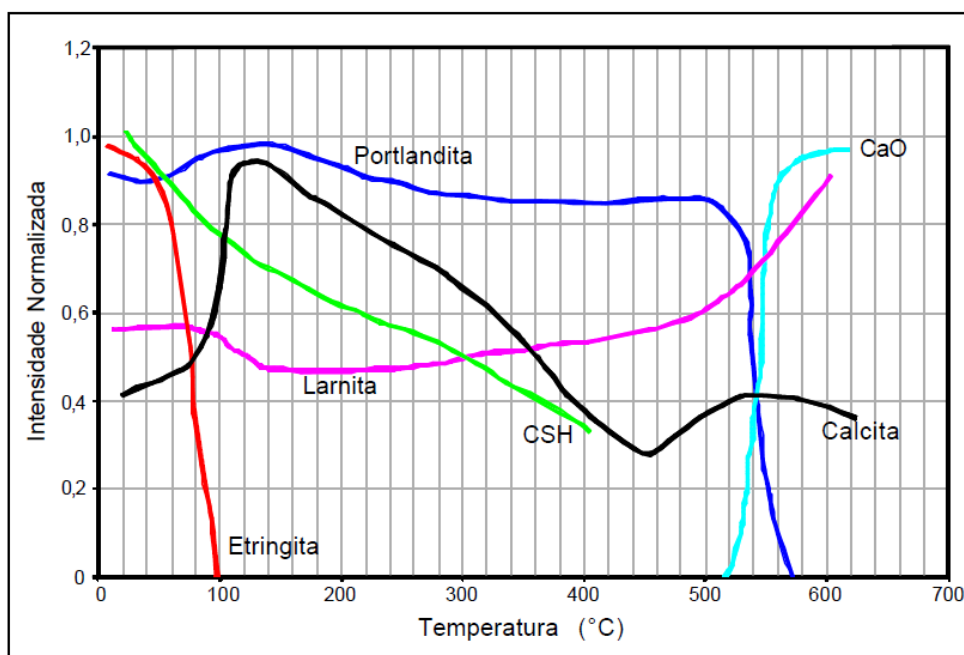


Figura 4: Evolução das fases cristalinas de cimentos durante o aquecimento: teor normal de C_3A

(fonte: CASTELLOTE *et al.*, 2003, *apud* LIMA, 2005)

Na Figura 5 pode-se observar o impacto das altas temperaturas na constituição dos agregados.

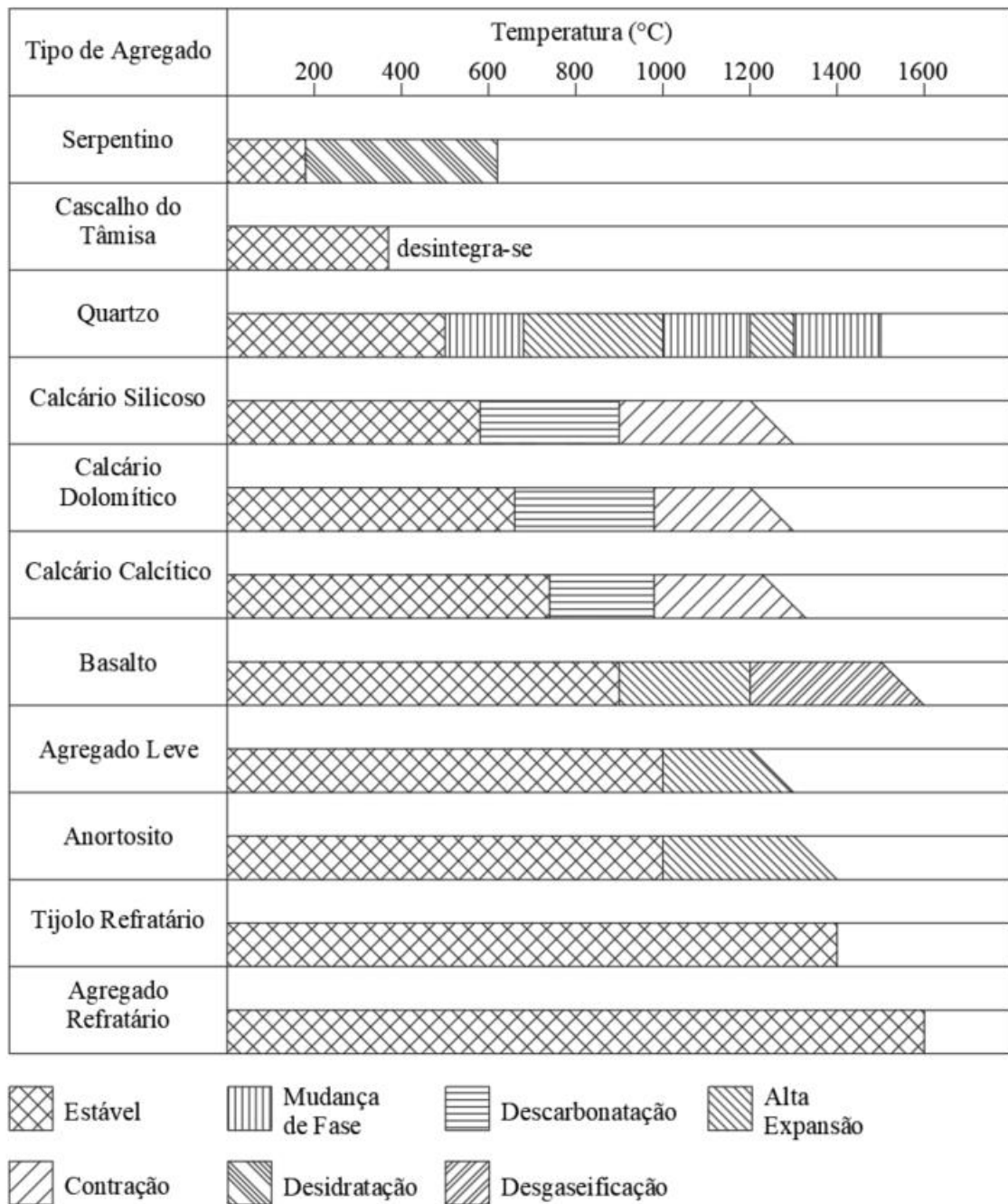


Figura 5: Estudo da estabilidade térmica e das transformações físico-químicas de diversos agregados em função da temperatura

(fonte: adaptado de FIB 2007, *apud* FARES, 2002)

O ensaio de resistência à compressão simples é o principal parâmetro para avaliar o impacto das altas temperaturas na resistência mecânica residual dos concretos expostos às temperaturas propostas. A variação na resistência resulta das alterações físico-químicas, como perda de água, dilatação e contração térmicas, e rearranjo cristalino (LIMA, 2005).

Há duas principais vertentes de consideração da resistência à compressão, na primeira o ensaio é realizado imediatamente após o resfriamento do corpo de prova até temperatura ambiente, enquanto a outra possibilidade é esperar um período maior e observar a evolução da resistência com o passar do tempo (ASNLANI; SAMALI, 2013). Um dos fenômenos que pode ocorrer quando o concreto aquecido acima de 600°C é resfriado é a reidratação do CaO (óxido de cálcio) resultando nova portlandita, o que gera expansões que podem contribuir com o aparecimento de fissuras. (LIMA, 2005).

Almeida (2017), ao analisar concretos convencionais e com cinza de casca de arroz, conclui que a temperatura de exposição foi o fator que mais significativamente influenciou nos resultados. Também registrou que a massa, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade diminuíram conforme exposição a temperaturas mais altas, tendo suas propriedades mecânicas afetadas de forma mais significativa acima de 400°C.

2.2 Comportamento do CAA após altas temperaturas

O concreto convencional produzido com quatro componentes base – cimento, água, agregado graúdo e agregado miúdo – apresenta um determinado grau de empacotamento. O concreto autoadensável, por sua vez, produzido não mais com quatro componentes base, mas com 6, sendo os dois adicionais: aditivos (superplastificantes ou modificadores de viscosidade) e materiais finos (pozolânicos ou não), apresenta um empacotamento maior que o convencional (TUTIKIAN, 2007).

Três propriedades devem ser alcançadas para que o concreto seja classificado como autoadensável: fluidez, habilidade passante/coesão e resistência à segregação (EFNARC, 2002; TUTIKIAN, 2007; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008):

- Fluidez é a habilidade do CAA de fluir e preencher, apenas sob ação do seu próprio peso, completamente todos os espaços dentro das formas.
- Habilidade passante (coesão) é a propriedade do CAA passar por pequenos espaços, como o espaço entre barras de aço, sem que ocorra segregação ou bloqueio do fluxo.
- Resistência à segregação é a capacidade do CAA permanecer homogêneo durante o transporte e ao fluir dentro das fôrmas até preenchê-las.

O maior grau de empacotamento é desejado, pois ao apresentar um empacotamento granular mais eficiente, ou seja, com menor volume de vazios possível, pode-se minimizar o volume de pasta do concreto, o que melhora características como o módulo de elasticidade além de torná-lo mais barato em função do menor consumo de cimento.

Quaisquer destes materiais podem ser empregados desde que sua combinação permita a obtenção do concreto autoadensável, visto que são praticamente os mesmos materiais base. Utilizar agregados mais arredondados e com diâmetro máximo ($D_{máx}$) menor permite otimizar o empacotamento, diminuindo a possibilidade de segregação da mistura, o que é um requisito básico do CAA (TUTIKIAN, 2007). A determinação do pacote granular é importante para misturas granulares embebidas em matrizes cimentícias, buscando sempre a combinação dos agregados de forma que se minimize a porosidade, reduzindo o consumo de pasta na mistura (TUTIKIAN, 2007).

O CAA apresenta em relação aos concretos convencionais um melhor adensamento e empacotamento por conta da presença dos finos (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). O princípio mais importante para concretos fluidos e resistentes à segregação, entre eles o CAA, é a utilização de aditivos superplastificantes em combinação com alto teor de materiais finos, os quais podem ser cimento Portland, adições minerais, *filler* de rochas, ou areia fina (TUTIKIAN, 2004).

Também, Bosiljkov (2003) afirma que a adição de materiais finos no CAA melhora diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Esta pesquisadora acredita que os finos atuam como pontos de nucleação, ou seja, quebram a inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água, obtendo-se, assim, ganhos de resistência nas primeiras idades. Assim como, aumentando-se o pacote de partículas finas, cresce a compacidade da pasta, dificultando a penetração de agentes externos agressivos e melhorando a zona de transição.

Resultados experimentais mostraram que o CAA apresentou reduções significativamente menores no coeficiente de permeabilidade ao oxigênio e absorção capilar de água, quando comparado ao concreto convencional referência, de faixas de resistência similares (ZHU; BARTOS, 2003). Os autores produziram dois concretos convencionais, teores de argamassa entre 49% e 51%, a/c 0,42 a 0,68; e três concretos autoadensáveis, teores de argamassa entre

64% e 66%, a/c 0,41 a 0,63; todos eles para duas faixas de resistência (40 e 60 MPa). Interessante destacar que, segundo Zhu e Bartos (2003), o traço de CAA que não recebeu qualquer adição de finos, apenas aditivo modificador de viscosidade para manter a coesão no estado fresco, apresentou, como era esperado, a maior permeabilidade, condutividade hidráulica e difusividade de cloreto.

No concreto existem poros de diversos formatos e dimensões, distribuídos por toda a matriz cimentícia, ver Figura 6. Durante o processo de hidratação, os espaços ocupados pelo cimento e água são ocupados pelos produtos da hidratação e partículas anidras. Os espaços que não são ocupados constituem a estrutura de poros (LIMA, 2005). Visto que esses vazios formam conexões, e assim redes, não apenas influenciam na resistência mecânica do concreto, mas também permitem a conexão com o meio externo, permitindo o transporte de água nas fases líquida e gasosa (SILVA FILHO, 1994).

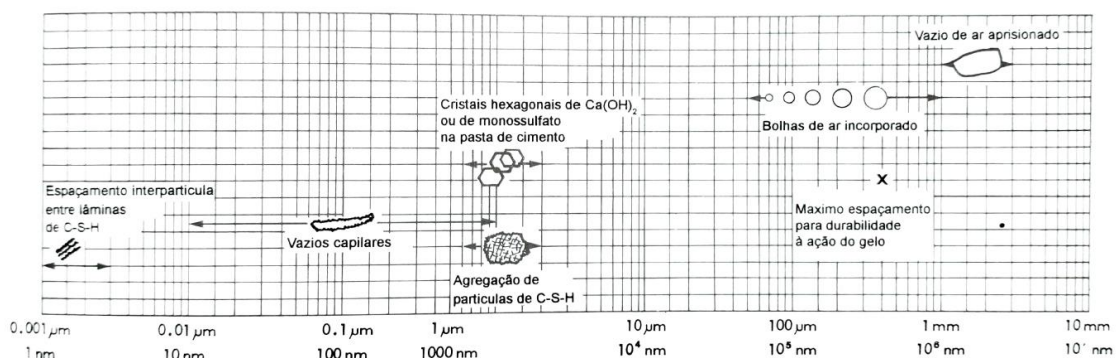


Figura 6: Intervalo dimensional de sólidos e poros em uma pasta endurecida

(Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014)

Analisando-se a durabilidade, o ideal é que se obtenha uma baixa permeabilidade. Embora a permeabilidade seja governada pela porosidade da pasta de cimento, a relação não é clara. Isso ocorre em virtude da distribuição e dimensões dos poros ser um fator relevante para tanto. Mesmo que a porosidade seja alta, a permeabilidade pode ser baixa devido à textura fina e mínimas dimensões dos poros de gel. A permeabilidade da pasta de cimento hidratada como um todo é maior devido à presença de poros capilares maiores. Como a porosidade capilar é governada pela relação água/cimento e pelo grau de hidratação, a permeabilidade também depende desses fatores. (NEVILLE; BROOKS, 2013).

O volume e tamanho dos poros capilares é determinado pela distância inicial entre as partículas de cimento anidro na pasta de cimento recém misturada (relação água/aglomerante) e o grau de hidratação do cimento. A interligação dos poros é o principal fator responsável pela permeabilidade da pasta de cimento endurecida. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A descontinuidade dos capilares está associada a uma baixa relação água/aglomerante e um período de cura úmida suficientemente longo. Com o decorrer do processo de hidratação, há um aumento no teor de sólidos na pasta. Em pastas hidratadas e densas, os capilares podem ser bloqueados pelo gel e segmentados de forma a se tornarem poros capilares interligados somente pelos poros de gel (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Autores que estudaram as propriedades de concretos convencionais em elevadas temperaturas relacionaram a redução da porosidade com a maior degradação do concreto em altas temperaturas, caracterizada por lascamentos e lascamentos explosivos, fenômeno conhecido como *spalling*. A antecipação ou intensificação desse fenômeno foi associada ao aumento da poro-pressão no concreto aquecido, atribuída à dificuldade da saída do vapor de água como consequência da redução da porosidade (ALMEIDA, 2017; HERTZ, 2003; KIRCHHOF, 2010). O *spalling* explosivo em concretos de alta resistência, menos porosos, também foi relacionado às taxas de aquecimento, sendo menos comum para as baixas, entre 1°C/min e 5°C/min, e mais comum para taxas elevadas (COSTA *et al.*, 2002; KIRCHHOF, 2010).

Considera-se o aumento da pressão interna dos poros devido à vaporização da água livre e quimicamente ligada, a principal razão para a fragmentação do concreto em altas temperaturas (ASLANI; SAMALI, 2013). Kirchof *et al.* (2020) relataram a não observação do *spalling* explosivo em amostras de concreto convencional de resistência normal, mesmo em amostras saturadas. O comportamento pode ser devido à maior conectividade dos poros, o que evita o aumento de pressão de vapor ao permitir a saída do vapor de água. Já nos corpos de prova de alta resistência, o fenômeno está relacionado à saturação e resistência à compressão. Em concretos com baixa porosidade/permeabilidade, à medida que o teor de umidade aumenta, a probabilidade de ocorrência de *spalling* aumenta concomitantemente.

Em relação à utilização do CAA, Tutikian (2004) destaca que exige cuidado, visto que a utilização de materiais finos torna sua matriz menos permeável que a do concreto convencional. Boston *et al.* (2007), que investigaram o comportamento de quatro traços de

CAA, um deles com fibra, destaca que concretos mais densos são muito mais propensos ao *spalling* devido à menor permeabilidade. Os ensaios mostraram que o *spalling* explosivo pode ser esperado se não forem tomadas precauções.

A magnitude da pressão depende da permeabilidade do concreto, ou seja, com que facilidade a água ou o vapor podem ser transportados dentro do concreto. Sugere-se a utilização de fibras de polipropileno no concreto, pois estudos tem apresentado resultados promissores na redução do fenômeno (BOSTRÖM *et al.*, 2007).

Alguns autores adotam a prática de secagem ou sazonalidade dos corpos de prova antes da exposição a altas temperaturas, essa prática tem se mostrado eficiente na prevenção do *spalling*, permitindo que os corpos de prova se mantenham íntegros para o estudo das propriedades residuais.

2.2.1 Referencial teórico sobre comportamento do CAA em altas temperaturas

O comportamento do CAA submetido a altas temperaturas ainda é pouco estudado. Entretanto, os poucos resultados têm mostrado perda de resistência e um aumento do risco de *spalling* (BOSTRÖM, 2003; PERSON, 2004).

Entre as pesquisas há estudos que ensaiam concretos convencionais e autoadensáveis para comparação de comportamentos, estudos que buscam investigar a influência das diferentes pozolanas e *fillers* outros que avaliam a influência de fibras de polipropileno, a influência do resfriamento por ar ou água, a influência da resistência à compressão dos CAA, alguns que estudam elementos estruturais com e sem ação de carregamentos, outros que focam nos fatores que podem influenciar o *spalling*, e ainda aqueles que comparam pesquisas e a variabilidade entre elas, principalmente em relação às taxas de aquecimento. Uma relação de uso de fibras, ocorrência de *spalling* e teores de argamassa calculados com base nos dados de materiais apresentados em algumas das principais pesquisas, nem todas apresentam esse nível de informação, que estudam CAA expostos ao fogo ou altas temperaturas é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Revisão sistemática de ocorrência de *spalling* em artigos sobre CAA em altas temperaturas

Autor	Concreto	Teor de Argamassa (%)	Fibra	<i>Spalling</i>
Anagnostopoulos <i>et al.</i> (2008)	CAA	59 a 63	Não	Sim (400°C)
	CC	57 a 58		Sim (600°)
Anand <i>et al.</i> (2016)	CAA	59 a 66	Não	Sim
Annerel e Taerwe (2010)	CAA	65	Não	Não*
	CC	45		
Annerel e Taerwe (2012)	CAA	70	Não	Não**
	CC	45		
Bamonte e Gambarova (2012)	CAA	-	Não	NC
Jansson e Boström (2013)	CAA	37 a 72	Sim e Não	Sim
Noumowé <i>et al.</i> (2006)	CC	49	Não	Não
	CAA	58	Não	Sim
Pathak e Siddique (2012)	CAA	60 a 62	Não	NC
Person (2004)	CAA	71 a 89	Sim e Não	Sim (8°C/min)
	CC	54 a 66	Não	Sim (8°C/min)
Qadi <i>et al.</i> (2012)	CAA	67	Não	NC
			Sim	NC
Sideris (2007)	CC	60 a 71	Não	Sim (400°C)
	CAA		Não	Sim (400°C)
Tao <i>et al.</i> (2012)	CAA AR	67	Sim	Sim***
	CAA	65	Não	Não
	CAA	65	Sim	Não
Uysal (2012)	CAA	65	Não	Não
	CAA FP		Não	Sim (600°C)
	CAA		Sim	Não
	CC FP		Sim	Sim (600°C)

* Testes preliminares mostraram alto risco de *spalling* para ambos os concretos CC e CAA. Então o CC foi seco durante um dia e o CAA foi seco durante 7 dias a 105°C.

** Após 20 meses, testes preliminares mostraram alto risco de *spalling* para ambos os concretos CC e CAA. Então o CC foi seco durante um dia e o CAA foi seco durante 7 dias a 105°C.

*** O concreto não suportou taxas de aquecimento acima de 5°C/min

NC - Não comenta
FP - Finos Pozolânicos

(fonte: elaborado pelo autor)

Em relação à avaliação de *fillers* e seu efeito sobre o comportamento do CAA, Bamonte e Gambarova (2012) estudaram a influência do *filler* calcário, constatando que as diferenças entre o concreto vibrado e o CAA estudados foram insignificantes quanto à degradação do material. Noumowé *et al.* (2006) estudaram o uso de *filler* calcário para verificar se ele diminuiria a permeabilidade do concreto, aumentando assim o risco de *spalling*, não informando conclusões sobre o tema. Já para Jansson e Boström (2013), um concreto com 140 kg/m^3 de *filler* calcário sofreu substancialmente mais *spalling* do que um concreto com mesma relação água/cimento e resistência à compressão aos 28 dias, mas sem *filler*.

Aslani e Samali (2013) afirmam que diferentes tipos de *filler* acarretam grandes diferenças nas resistências à compressão e à tração dos CAA. Enquanto Qadi *et al.* (2012) estudaram CAA com adição de cinza volante, com e sem fibras de polipropileno e não relataram *spalling*. Relacionado à resistência à compressão, Noumowé *et al.* (2006) concluíram que o risco de *spalling* aumenta para CAA de alta resistência em relação a CC de alta resistência. O *spalling* também foi observado por Noumowé *et al.* (2006) em CAA de alta resistência mesmo para taxas baixas de aquecimento, como $0,5^\circ\text{C}/\text{min}$.

Boström (2003) avaliou mais de 50 tipos de CAA e concluiu que esse tipo de concreto apresenta probabilidade muita alta de *spalling* caso não sejam tomadas precauções. Outros autores também observaram o fenômeno de *spalling* como mostram as Figura 7 e Figura 8.

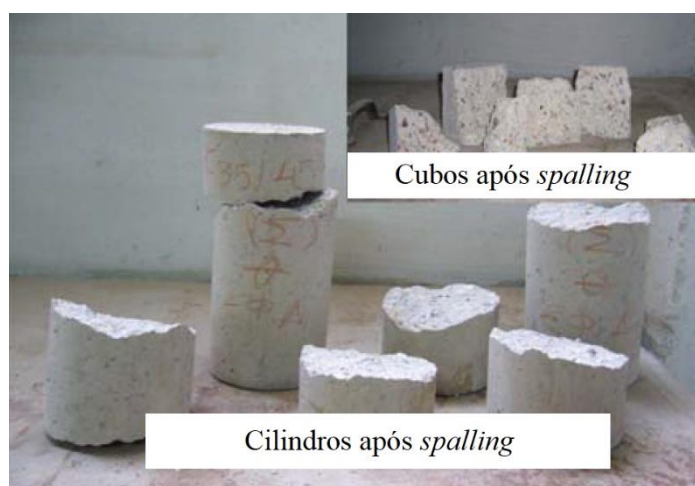


Figura 7: Corpos de prova de CAA que sofreram *spalling* a 600°C

(fonte: ANAGNOSTOPOULOS *et al.*, 2009)



Figura 8: Corpos de prova de CC que sofreram *spalling* a 500°C

(fonte: SIDERIS, 2007)

Annerel e Taerwe (2010) condicionaram seus corpos de prova a 105°C até constância de massa, que foi atingida em 1 dia para o CC e em 7 dias para o CAA. E constataram que, para seu material, a resistência à compressão em função da temperatura diminuiu mais rápido para o CC do que para o CAA.

Sobre fibras de polipropileno, Noumowé *et al.* (2006) concluíram que assim como para o CC de alta resistência, elas melhoram a estabilidade térmica de CAA de alta resistência. Aslani e Samali (2013) concluíram que as fibras de polipropileno impactam positivamente também no comportamento de CAA de resistências não elevadas. Qadi *et al.* (2012) estudaram o efeito das fibras de polipropileno sobre as propriedades termogravimétricas do CAA, determinando um volume ótimo de 0,05% de volume para evitar *spalling*.

A velocidade de pulso ultrassônico pode ser utilizada como medida de avaliação da qualidade residual do concreto (QADI *et al.*, 2012). Alguns autores correlacionaram a resistência mecânica residual com a medida VPU residual e propuseram uma equação para prever resistência mecânica residual por meio de VPU (YANG *et al.*, 2009).

Uysal (2012) e Yang *et al.* (2009) verificaram que a VPU dos CAA se reduz com o aumento da temperatura, também se percebeu uma redução mais significativa na marca de 400°C. Os autores afirmam que a velocidade é afetada pelas microfissuras do material. Sendo assim, com o incremento da temperatura e a progressão das fissuras, a VPU deve cair ainda mais. Uysal (2002) concluiu também que adição de fibras teve um efeito negativo sobre a VPU dos CAA expostos a altas temperaturas.

2.2.2 Taxas de aquecimento para avaliação de concretos em altas temperaturas

Quanto às taxas de aquecimento para avaliar as propriedades residuais dos concretos submetidos a elevadas temperaturas, a literatura apresenta taxas de aquecimento de $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (NOUMOWÉ, 2006), $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (AZARIJAFARI *et al.*, 2019; FARES *et al.*, 2009; PATHAK; SIDDIQUE, 2012), 1 a $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (BAMONTE; GAMBAROVA, 2012), $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (ANNEREL *et al.*, 2017), $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (PERSON, 2004), $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (ANNEREL; TAERWE, 2010; SIDERIS, 2007), 4 a $6^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (REINHARDT; STEGMEIER, 2006), $8^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (PERSON, 2004) e $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (ANAGNOSTOPOULOS *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2008). A Figura 9 permite visualizar a variabilidade de taxas e temperaturas máximas entre os diferentes autores.

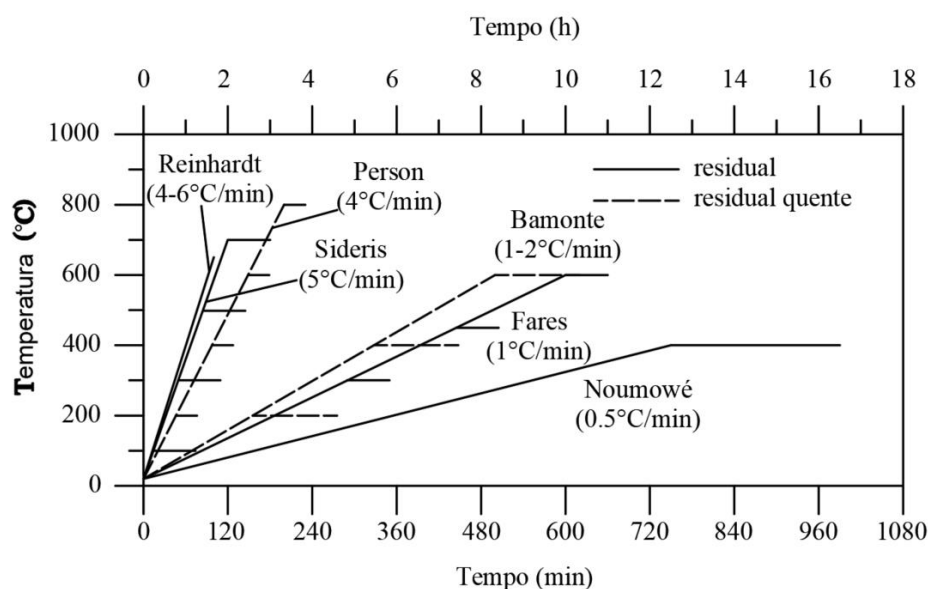


Figura 9: Rampas de aquecimento adotadas por diferentes autores

(fonte: BAMONTE; GAMBAROVA, 2012)

Na literatura encontram-se diferentes períodos de homogeneização térmica (considera-se concluída a homogeneização da temperatura quando toda a massa do corpo de prova atinge mesma temperatura), embora os autores não justifiquem suas decisões, como por exemplo: 60 minutos (SIDERIS, 2007; PATHAK; SIDDIQUE, 2012), 120 minutos (UYSAL, 2012) e 750 minutos (ANNEREL; TAERWE, 2010).

Autores como Anand *et al.* (2016) removeram os corpos de prova do forno após o aquecimento, enquanto Uysal (2012), Sideris (2007) e Anagnostopoulos (2008) apenas desligaram os fornos e deixaram que os corpos de prova resfriassem dentro deles. Annerel e Taerwe (2012) concluíram que aquecimentos e resfriamentos lentos evitam que ocorram choques térmicos que resultariam em perda de resistência.

2.3 Pesquisas sobre concretos expostos a altas temperaturas desenvolvidas no LEME

O Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME) vem desenvolvendo há mais de uma década diversas pesquisas na área de concretos expostos a elevadas temperaturas. Citam-se como exemplos os diversos trabalhos de conclusão de curso realizados por:

- Biazetto (2018) – Análise experimental da porosidade e das propriedades mecânicas do concreto submetido à fadiga térmica;
- Bidinotto (2018) – Análise experimental de capacidade de carga residual e *spalling* em pilaretes de concreto armado com concretos de diferentes classes de resistência em situação de incêndio;
- Marques (2018) – Reforço de pilaretes de concreto armado expostos a altas temperaturas com a utilização de tecido de fibra de carbono;
- Nunes (2018) – Análise experimental da influência da técnica de resfriamento, tipo e período de cura em elementos de concreto submetidos a altas temperaturas;
- Padilha (2019) – Análise experimental do desempenho mecânico e de durabilidade de concreto estrutural com resíduos de polipropileno e cinza de casca de arroz sem controle de queima exposto a elevadas temperaturas;
- Perin (2019) – Influência da resistência à compressão no *spalling* explosivo em concretos de alta resistência em situação de incêndio.

Dissertações de mestrado:

- Wendt (2006) – Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas como indicativo de temperaturas alcançadas e da degradação térmica;
- Caetano (2008) – Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas;

- Ruschel (2011) – Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre - RS;
- Ferreira (2019) – Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas.

E teses de doutorado:

- Lima (2005) – Investigação do Comportamento de Concretos em Temperaturas Elevadas;
- Kirchhof (2010) – Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de *spalling* explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas;
- Souza (2014) – Comportamento do concreto frente à condição de altas temperaturas: Análise das propriedades mecânicas residuais;
- Almeida (2017) – Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz.

A presente pesquisa visa, baseando-se e utilizando-se do conhecimento e *know-how* do grupo, ampliar a investigação do comportamento dos concretos em temperaturas elevadas. Isso se dá pela abertura de novos horizontes com a produção de Concretos Autoadensáveis, até então não produzidos pelo grupo. O desenvolvimento dos CAA envolveu pesquisa teórica, sensibilidade prática e contou com o apoio nas discussões iniciais da Prof.^a Dra. Denise Dal Molin, especialista em concretos autoadensáveis.

A investigação do concreto autoadensável exposto a altas temperaturas é ainda muito aquém do necessário, visto que poucas pesquisas sobre seu comportamento foram desenvolvidas tanto nacionalmente quanto internacionalmente. Desta forma a presente pesquisa insere-se em um momento de ampliação do uso do CAA em edificações residenciais e comerciais, no qual sua utilização implica em aumento da possibilidade de exposição a fogo e altas temperaturas em situação de incêndio.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e os meios utilizados para atender aos objetivos da pesquisa. São expostas as variáveis analisadas tendo como base a bibliografia existente. São apresentados e justificados os procedimentos de produção, cura, armazenagem, aquecimento e ensaios realizados nos corpos de prova.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa, cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo, finos não pozolânicos e aditivos estão descritos na sequência.

3.1.1 Aglomerante

Adotou-se como aglomerante o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). A escolha tem como fundamento a sua maior pureza, determinada pela NBR 16697 (ABNT, 2018a), que apresenta os limites de composição do cimento Portland. Esse fator contribui para a velocidade do ganho de resistência e facilita o mapeamento do espalhamento da radiação eletromagnética, em função do número de interferências, ou picos, gerados no ensaio de Difração de Raios-X.

As propriedades físico-químicas informadas pelo fabricante, Cimento Nacional, encontram-se na Tabela 4, enquanto na Tabela 5 encontram-se os dados do fabricante para composição do cimento.

Tabela 4: Propriedades físico-químicas do cimento

Estado Físico	Sólido
Forma	Pó
Cor	Cinza
Odor	Característico
pH	13
Massa específica aparente	1,2 g/cm ³
Densidade	2,99 g/cm ³
Solubilidade em Ácido Clorídrico	99%1
Solubilidade em Água	1,5 g/l

(fonte: adaptado de CIMENTO NACIONAL, 2018)

Tabela 5: Composição e informação sobre os componentes do cimento

Substância	Concentração (% em massa)
Silicato Tricálcico	20 - 70
Silicato Dicálcico	10 - 60
Ferro-aluminato de cálcio	5 - 15
Sulfato de Cálcio	2 - 8
Aluminato Tricálcico	1 - 15
Carbonato de Cálcio	0 - 25
Óxido de Magnésio (livre)	0 - 6
Óxido de Cálcio (livre)	0 - 2

(fonte: adaptado de CIMENTO NACIONAL, 2018)

Todo o cimento utilizado na pesquisa é originário do mesmo lote: “L2 TC C1 05/08/2021 22:40”. Desta forma são informados os resultados do “Certificado de ensaios em cimento” emitido pelo Laboratório Técnico da Fábrica de Sete Lagoas – MG para o mês de agosto de 2021. Os ensaios Físicos, Químicos e Mecânicos para o CPV-ARI MAX são apresentados respectivamente na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 6: Ensaios químicos - Cimento Nacional

Ensaios	Metodologia	Un.	Resultado	Exigências
Resíduo Insolúvel - RI	ABNT NBR NM 15	%	1,41	≤ 3,5
Perda ao Fogo - PF	ABNT NBR NM 18	%	4,03	≤ 6,5
Óxido de Magnésio - MgO	ABNT NBR 14656	%	1,16	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO ₃	ABNT NBR 14656	%	4,07	4,5
Óxido de Sódio - Na ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,07	não aplicável
Óxido de Potássio - K ₂ O	ABNT NBR 14656	%	0,76	não aplicável
Equivalente Alcalino - Na ₂ O _{eq}	Na ₂ O. 0,658*K ₂ O	%	0,57	não aplicável

(fonte: adaptado de NACIONAL, 2022)

Tabela 7: Ensaios físicos - Cimento Nacional

Ensaios	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Área Específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	cm ² /g	4.791	não aplicável
Massa Específica	ABNT NBR 16605	g/cm ³	3,10	não aplicável
Finura pela peneira 75 µm	ABNT NBR 11579	%	0,39	≤ 6,0
Finura pela peneira 45 µm	ABNT NBR 9202/85	%	2,42	não aplicável
Água de consistência da pasta	ABNT NBR 16606	%	29,9	não aplicável
Início de pega	ABNT NBR 16607	min	145	≥ 60
Fim de pega	ABNT NBR 16607	min	206	≤ 600
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	mm	1,8	≤ 5

(fonte: adaptado de NACIONAL, 2022)

Tabela 8: Ensaios mecânicos - Cimento Nacional

Ensaios	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigências
Resistência à Compressão - 1 dia	ABNT NBR 7215	MPa	28,7	≥ 14
Resistência à Compressão - 3 dias	ABNT NBR 7215	MPa	40,1	≥ 24
Resistência à Compressão - 7 dias	ABNT NBR 7215	MPa	48,2	≥ 34
Resistência à Compressão - 28 dias	ABNT NBR 7215	MPa	58,4	não aplicável

(fonte: adaptado de CIMENTO NACIONAL, 2022)

3.1.2 Agregado graúdo

Utilizou-se agregado graúdo basáltico, limitado ao diâmetro máximo de 12,5 mm, processado em britador de impacto vertical (VSI) na última fase do circuito de britagem, o que produz um agregado mais cúbico.

A caracterização do agregado seguiu o prescrito pelas normas: NBR NM 248 (ABNT, 2003) para composição granulométrica, e NBR NM 53 (ABNT, 2009) para a massa específica aparente e absorção de água. A composição granulométrica está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9: Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura das Peneiras (mm)	Ensaio Próprio da Pesquisa		Ensaio da Pedreira	
	% Retida Média	% Retida Acumulada	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 12,5	0	0	0	0
# 9,5	27	27	20	20
# 6,3	53	80	55	75
# 4,75	18	98	21	96
# 2,36	2	100	3	99
Módulo de Finura	6,25		6,15	
Dimensão Máxima Característica	12,5 mm		12,5 mm	

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 10 são apresentadas as curvas de composição granulométrica do agregado graúdo, os limites apresentados são da NBR 7211 (ABNT, 2009).

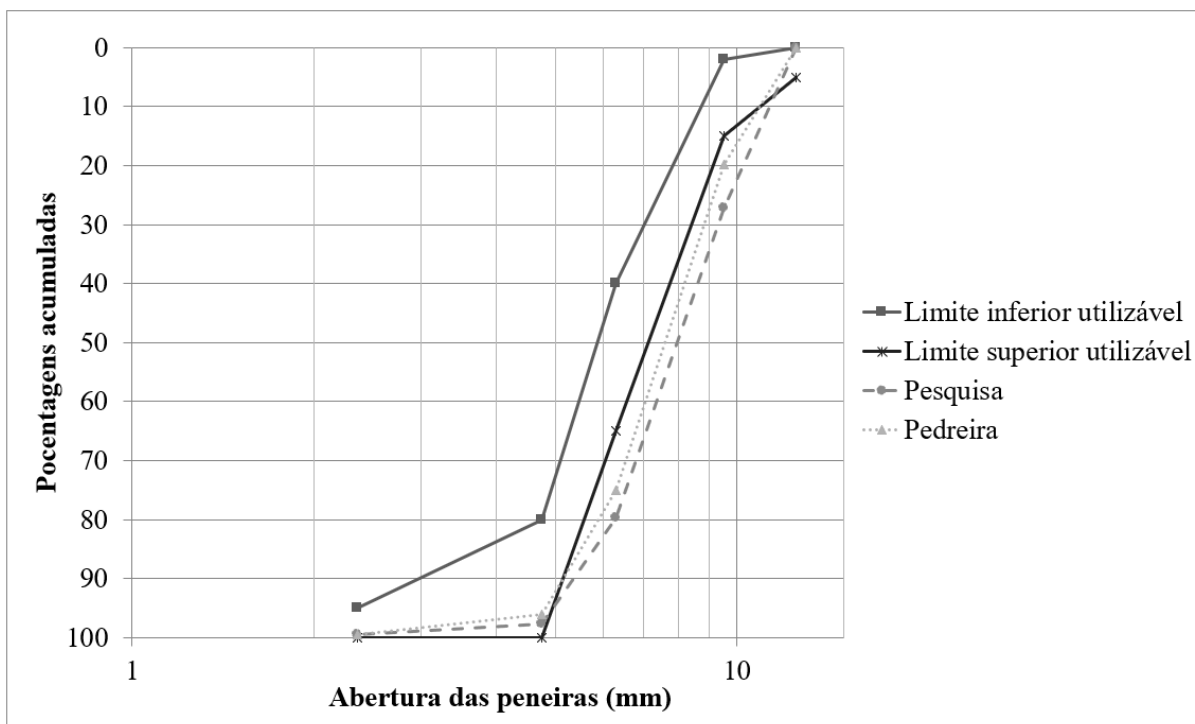


Figura 10: Curva de composição granulométrica para agregado graúdo

(fonte: elaborado pelo autor)

A determinação da densidade e da absorção de água seguiu o recomendado pela NBR 16917 (ABNT, 2021). Os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Densidade e absorção de água - agregado graúdo

ρ_s – densidade do agregado na condição seca	2,88 g/cm ³
ρ_{SSS} – densidade do agregado na condição saturada superfície seca	2,92 g/cm ³
Abs - Absorção de água	1,2 %

(fonte: elaborado pelo autor)

3.1.3 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado em todos os concretos produzidos na presente pesquisa foi denominado “areia regular”. O agregado constitui-se como areia de rio extraído por dragas de sucção e comercializada a granel no município de Porto Alegre. O material é proveniente do leito de rios das Bacias Hidrográficas do Baixo Jacuí e Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba, encontra-se naturalmente sedimentado em depósitos aluvionares e deltaicos (KIRCCHOF, 2015), e tem origem quartzosa e quartzo-feldspáticas (TEIXEIRA *et al.*, 2009).

A caracterização do agregado seguiu o prescrito pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A granulometria da areia regular utilizada no desenvolvimento da pesquisa está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Granulometria do agregado miúdo – areia regular

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,50	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	8	8
# 1,18	10	18
# 0,60	11	29
# 0,30	29	58
# 0,15	41	99
Módulo de Finura	2,12	
Dimensão Máxima Característica	4,75 mm	

(fonte: elaborado pelo autor)

A densidade e a absorção de água foram determinadas conforme procedimento descrito pela NBR 16916 (ABNT, 2021), e os resultados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Densidade e absorção de água – areia regular

ρ_s – densidade do agregado na condição seca	2,63 g/cm ³
ρ_{SSS} – densidade do agregado na condição saturada superfície seca	2,64 g/cm ³
Abs – absorção de água	0,6 %

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 11 são apresentadas as curvas de composição granulométrica. Os limites apresentados são da distribuição granulométrica do agregado miúdo para aplicação em concreto conforme NBR 7211 (ABNT, 2009), para distribuição granulométrica determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

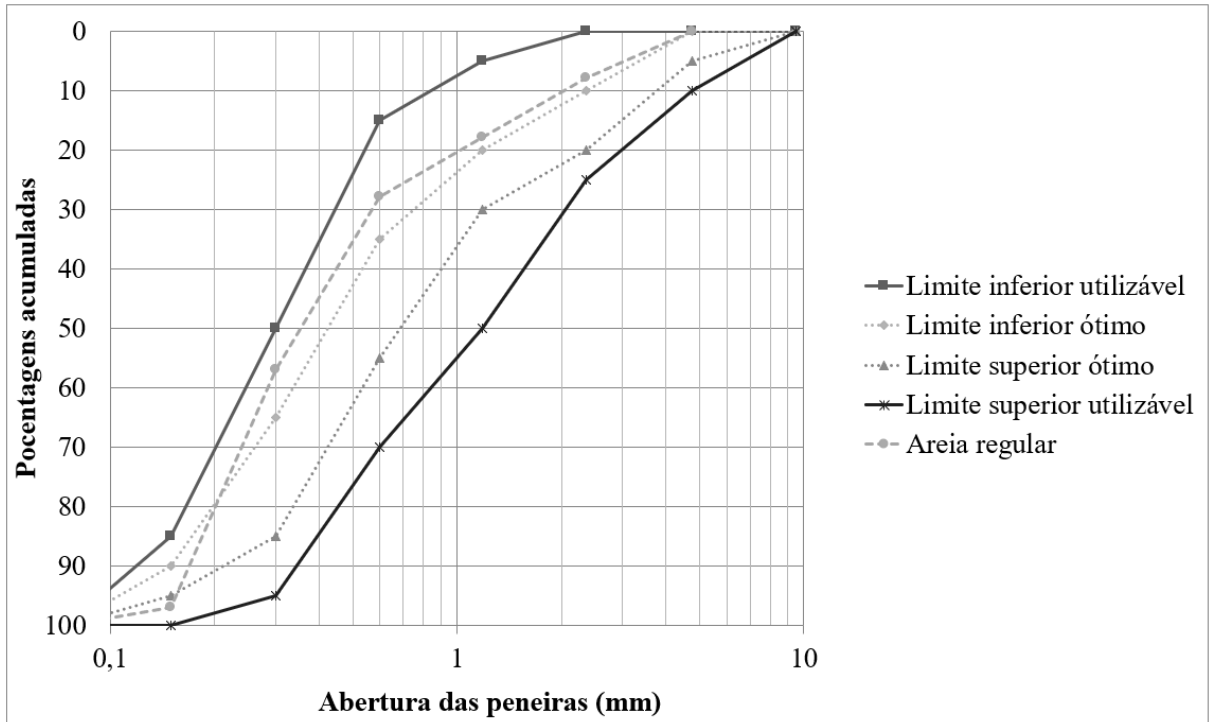


Figura 11: Curva de composição granulométrica para agregado miúdo – areia regular

(fonte: elaborado pelo autor)

3.1.4 Fino não pozolânico

O fino não pozolânico empregado, areia fina, é de origem quartzosa e quartzo-feldspáticas, característica das jazidas de extração do município de Osório, local de onde foi extraída; comercializado já peneirado em sacos de 20 kg no município de Viamão, não apresentando matéria orgânica em sua composição.

A caracterização do agregado seguiu o prescrito pela norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A granulometria da areia fina utilizada no desenvolvimento da pesquisa está apresentada na Tabela 13.

Tabela 13: Granulometria do agregado miúdo – areia fina

Abertura das Peneiras (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,50	0,0	0,0
# 4,75	0,0	0,0
# 2,36	0,0	0,0
# 1,18	0,0	0,0
# 0,60	0,0	0,0
# 0,30	4	4
# 0,15	89	93
Módulo de Finura	0,97	
Dimensão Máxima Característica	0,3 mm	

(fonte: elaborado pelo autor)

A densidade e a absorção de água foram determinadas conforme procedimento descrito pela NBR 16916 (ABNT, 2021), e os resultados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14: Densidade e absorção de água – areia fina

ρ_s – densidade do agregado na condição seca	2,59 g/cm ³
ρ_{SSS} – densidade do agregado na condição saturada superfície seca	2,60 g/cm ³
Abs – absorção de água	0,3 %

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 12 são apresentadas as curvas de composição granulométrica. Os limites apresentados são da distribuição granulométrica do agregado miúdo para aplicação em concreto conforme NBR 7211 (ABNT, 2009), para distribuição granulométrica determinada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

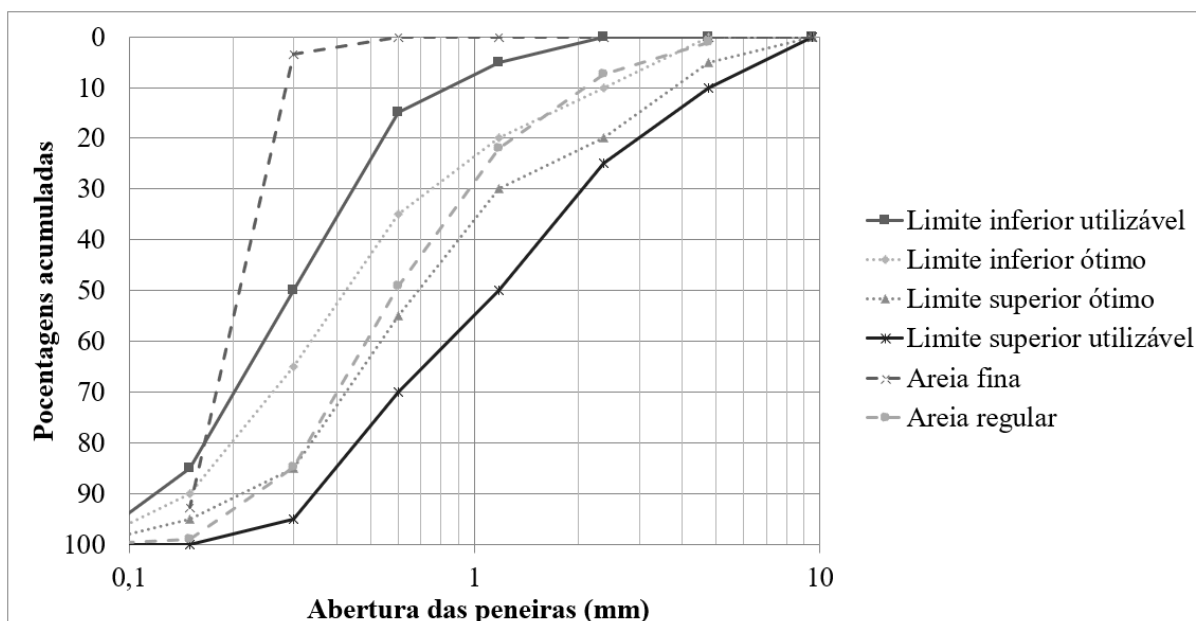


Figura 12: Curva de composição granulométrica para agregado miúdo – areia fina

(fonte: elaborado pelo autor)

A curva representativa da areia regular foi mantida na Figura 12 a fim de possibilitar graficamente a comparação entre ambas as areias utilizadas. É importante salientar que os finos pozolânicos ou não pozolânicos, quando adicionados ao concreto, devem ter área superficial maior do que a do componente que substituem (TUTIKIAN, 2004).

3.1.5 Água

Será utilizada água da rede de abastecimento local, fornecida pelo DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto, a qual atende aos parâmetros de potabilidade. Dados publicados referentes a novembro de 2021, indicam pH 6,3 e cloro residual livre 1,05 mgCl₂/l (DMAE, 2021).

3.1.6 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante foi empregado com o objetivo de aumentar a trabalhabilidade do concreto, permitindo assim a produção de concretos com maior trabalhabilidade sem necessidade de se aumentar o teor de argamassa, consumo de cimento ou relação água/cimento.

Utilizou-se aditivo superplastificante líquido ADVA® 458, o qual baseia-se em cadeias de éter policarboxilato modificado quimicamente, aditivo de terceira geração, de coloração

alaranjada e massa específica entre 1,075 e 1,115 g/cm³, atuando como dispersante do material cimentício (GCP APPLIED TECHNOLOGIES INC, 2021a).

3.1.7 Aditivo modificador de viscosidade

O Aditivo Modificador de Viscosidade (VMA) foi empregado com o objetivo de aumentar a viscosidade, evitando a segregação, mantendo a estabilidade e a fluidez.

Utilizou-se o aditivo líquido V-MAR® 3, o qual baseia-se em um biopolímero, tem coloração amarelo claro a cinza, aspecto liquidoviscoso e massa específica entre 0,990 e 1,030 g/cm³ (GCP APPLIED TECHNOLOGIES INC, 2021b).

3.2 Programa experimental

O programa experimental adotado nesta pesquisa inicialmente contou com a realização de uma etapa preliminar para determinar a taxa de aquecimento utilizada bem como o período necessário para a homogeneização da temperatura dos corpos de prova. Posteriormente foi desenvolvido o projeto de pesquisa principal, visando atingir o objetivo da pesquisa.

3.2.1 Descrição da etapa preliminar

A Etapa Preliminar consistiu na definição dos parâmetros de aquecimento que foram adotados para toda a pesquisa, e está apresentada em forma de organograma na Figura 13.

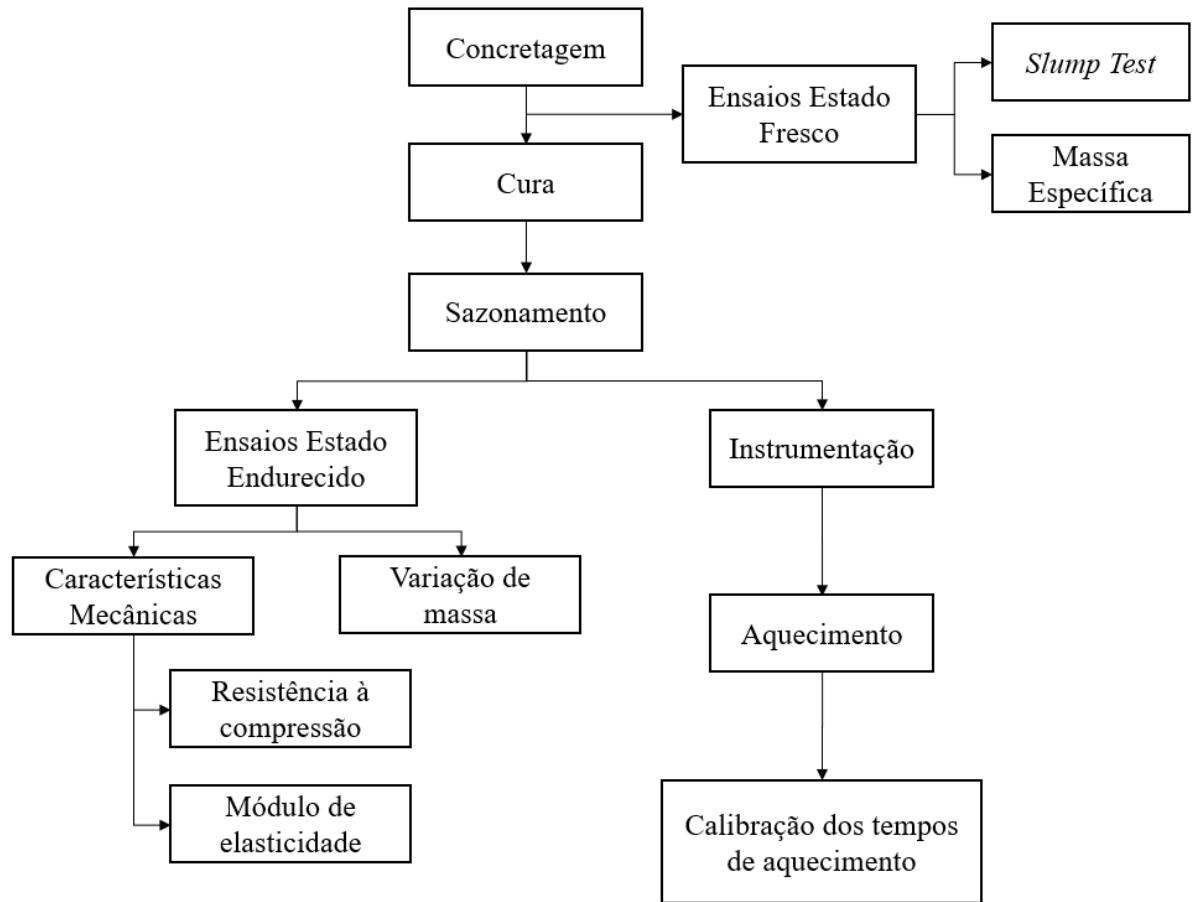


Figura 13: Organograma da etapa experimental

(fonte: elaborado pelo autor)

A exposição dos corpos de prova a altas temperaturas foi realizada com a utilização de forno elétrico com elevada capacidade de aquecimento (mufla), similar à Figura 14.



Figura 14: Forno Elétrico (mufla)

(fonte: próprio autor)

Na Tabela 15 são apresentadas taxas de aquecimento e resfriamento recomendadas para concretos de densidade normal em função do diâmetro do cilindro, destaque para o diâmetro e taxa de aquecimento adotados na pesquisa, para que seja garantida uma temperatura homogênea ao longo da circunferência do corpo de prova e axialmente ao longo do comprimento de referência.

Tabela 15: Taxa de aquecimento recomendada, máxima taxa de resfriamento e máximo período entre medições de temperatura da superfície do corpo de prova

Diâmetro máximo do elemento cilíndrico (mm)	Taxa de aquecimento ou resfriamento (°C/min)	Intervalo de Medição de temperatura (min)
150	0,5	16
100	1,0	8
80	2,0	4
60	4,0	2

(fonte: adaptado de RILEM, 1995)

Primeiramente foram configurados diferentes fornos disponíveis para que se atingisse o aquecimento mais lento possível ou 1°C/min. As taxas de aquecimento foram constantes e medidas em graus Celsius por minuto (°C/min). Após atingir-se a taxa recomendada de 1°C/min em um dos fornos, esta foi adotada para todos os ensaios realizados durante a pesquisa.

Foram moldados corpos de prova com a utilização de um dos traços de concreto da pesquisa, e estes foram instrumentados com a utilização de termopares posicionados em seus centros. Os corpos de prova foram então aquecidos com a taxa de aquecimento constante previamente definida, por tempo suficiente para que o forno atingisse a temperatura alvo. A partir desse momento foram monitoradas as temperaturas internas dos corpos de prova até que estas também atingissem a temperatura alvo de aquecimento.

É importante garantir que todo o corpo de prova alcance a temperatura alvo, havendo assim a homogeneização dos efeitos térmicos sobre todo o material.

Após a determinação do tempo necessário para a o equilíbrio térmico entre o exterior e o interior dos corpos de prova para cada temperatura alvo, esse período foi adotado como

padrão de homogeneização da temperatura. Esse procedimento foi realizado para todos os patamares de temperatura que foram analisados nesta pesquisa e está descrito no item 4.

De forma a caracterizar o concreto utilizado nesta etapa, foram realizados os ensaios no estado fresco, e, no estado endurecido, determinadas as características mecânicas e variação de massa. O objetivo desses ensaios é permitir comparações entre o concreto produzido para a etapa de calibração e os concretos produzidos no projeto de pesquisa principal.

3.2.2 Projeto de pesquisa

O projeto de pesquisa consiste na etapa principal do trabalho, envolve todas as etapas desde a concretagem até os ensaios no estado endurecido, e está apresentado em forma de organograma na Figura 15.

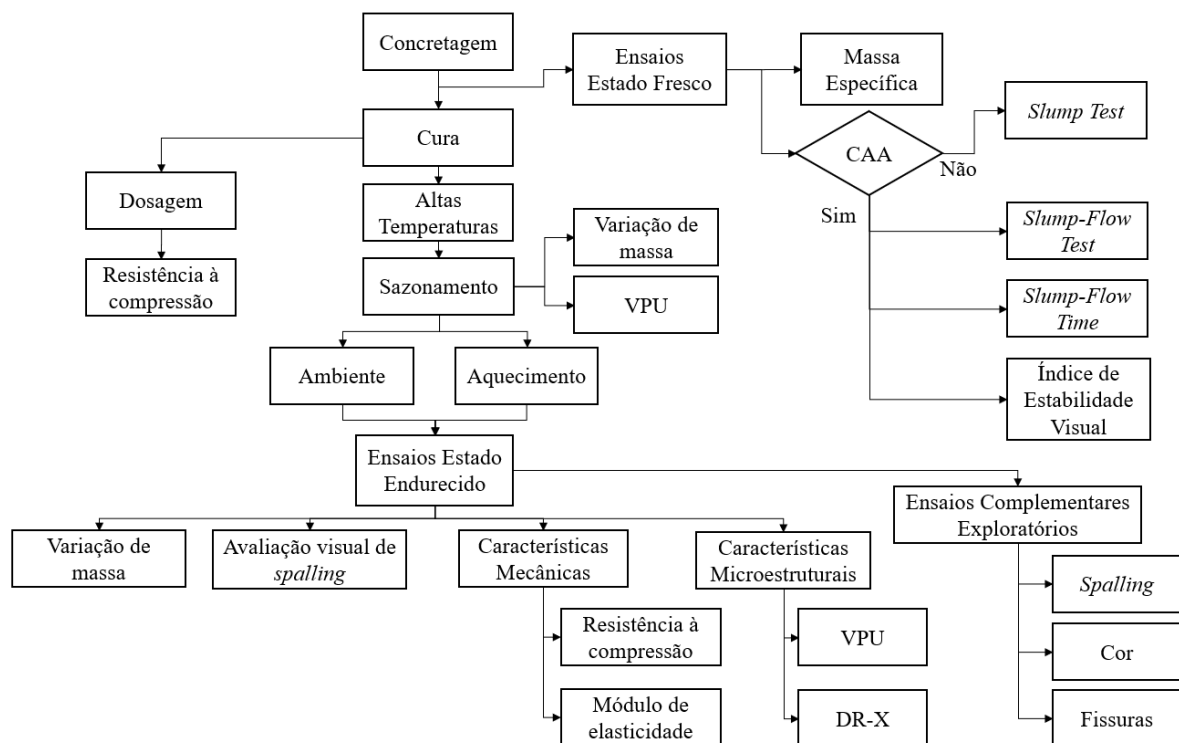


Figura 15: Organograma do Projeto de Pesquisa

(fonte: elaborado pelo autor)

Para que fossem atingidos os objetivos propostos na presente pesquisa, produziram-se três famílias de concreto; sendo uma de concreto convencional, e duas de concreto autoadensável, conforme apresentado a seguir:

- Concreto Convencional (CC);

- Concreto Autoadensável Substituição por Finos Não Pozolânicos (CAA-NP);
- Concreto Autoadensável com Aditivo Modificador de Viscosidade (CAA-VMA).

Considerando-se as limitações de tempo e de recursos da pesquisa, optou-se pela substituição de apenas um tipo de fino não pozolânico, a areia fina; e de apenas uma opção de VMA, descritos no item 3.1.

O concreto convencional foi produzido como concreto referência para comparação, mesmo que indireta ou qualitativa, com os autoadensáveis, posto que utilizará os mesmos materiais das outras famílias e terá o mesmo teor de argamassa que os concretos autoadensáveis.

Os corpos de prova foram expostos a seis temperaturas de exposição incluindo-se a ambiente:

- Ambiente;0
- 200°C;
- 400°C;
- 600°C;
- 800°C;
- 1000°C.

Inicialmente realizou-se a Etapa de Dosagem, que consistiu na produção de três traços (1:3,5; 1:5; 1:6,5) para cada família de concreto estudada, e tem por finalidade gerar as curvas de dosagem em relação à resistência à compressão.

Os fatores controláveis e os níveis adotados para a Etapa de Dosagem estão descritos na Tabela 16, onde também é informado o total de corpos de prova produzidos para que se gerem as curvas. Foram rompidos dois corpos de prova em cada idade.

Tabela 16: Fatores controláveis e níveis para etapa de dosagem

Fatores Controláveis	Níveis	Quantidade
Famílias	CC / CAA-VMA / CAA-NP	3
Traços	1:3,5 / 1:5 / 1:6,5	3
Idades (dias)	3 / 7 / 28 / 63	4
Ensaio Destrutivos	Resistência à compressão	1
CPs por ensaio	-	2
Total:	-	72

(fonte: elaborado pelo autor)

Após a dosagem, foi realizado o estudo referente aos corpos de prova quando submetidos a elevadas temperaturas. Os fatores controláveis e os níveis adotados para os resultados de pesquisa estão descritos na Tabela 17, onde também é informado o total de CPs produzidos. Nessa etapa estão previstos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Tabela 17: Fatores controláveis e níveis para pesquisa

Fatores Controláveis	Níveis	Quantidade
Concretos	CC / CAA-VMA / CAA-NP	3
Traços	1:3,5 / 1:5 / 1:6,5	3
Idades (dias)	7+63	1
Temperaturas (°C)	Ambiente, 200, 400, 600, 800, 1000	6
Ensaio Destrutivos	Resistência à compressão / Módulo de elasticidade	2
CPs por ensaio	-	3
Total:	-	324

(fonte: elaborado pelo autor)

Os corpos de prova desta etapa foram mantidos durante 7 dias em câmara úmida e, após esse período, foram mantidos mais 63 dias em condições especiais de condicionamento (temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e UR = 50%) para proporcionar uma baixa umidade nos corpos de prova com o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de *spalling* na etapa de aquecimento.

De cada traço produzido foram moldados três corpos de prova para cada ensaio destrutivo na fase de pós-aquecimento. Os ensaios destrutivos foram o ensaio descrito pela NBR 5739 (ABNT, 2018b) para a determinação da resistência à compressão e o ensaio descrito pela NBR 8522 (ABNT, 2017b) para a determinação do módulo de elasticidade à compressão do concreto endurecido.

Adicionalmente foram produzidos 4 CPs para cada uma das 9 combinações, ou seja, 36 CPs adicionais. Dos quais 27 CPs foram mantidos por 28 dias, ou até que fosse atingida a constância de massa, em forno sob temperatura constante de $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ para que fosse mensurada, por diferença de massa, a quantidade de água perdida nesse período (RILEM, 2004). O resultado obtido permitiu estimar o teor umidade dos CPs que foram ensaiados até as temperaturas alvo da pesquisa. Enquanto outros 9 CPs – um de cada traço – foram aquecidos sem passar pela etapa de sazonalamento e com taxas de aquecimento maiores para verificar a possível ocorrência de *spalling* (ensaio realizado de forma complementar e apenas com intenção de análise preliminar e qualitativa sobre o *spalling*). Sendo assim a quantidade final foi de 432 CPs, ou seja, 48 CPs por traço, conforme apresentado na Figura 16.

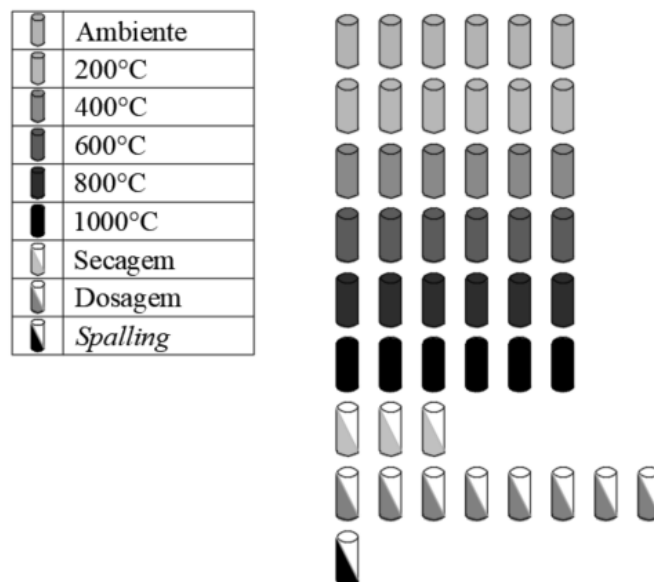


Figura 16: Identificação do tratamento dado aos CPs para cada um dos traços

(fonte: elaborado pelo autor)

3.3 Definição, moldagem e cura dos concretos

3.3.1 Definição dos traços

Os traços utilizados foram definidos com base nos seguintes critérios: traços que possam ser utilizados em obras comuns, desta forma seu custo deve ser compatível com os valores de mercado; devem utilizar materiais de fácil aquisição, e agregados facilmente encontrados no mercado local, produzidos preferencialmente na Região Metropolitana de Porto Alegre; suas faixas de resistência são condizentes com as aplicações correntes em obras regionais.

3.3.2 Método de dosagem

O método de dosagem utilizado para a produção do Concreto Convencional foi o Método IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). O teor de argamassa utilizado foi definido nesta etapa, esse método influenciou também as características obtidas no concreto autoadensável.

O método utilizado para a produção dos Concretos Autoadensáveis foi o Método desenvolvido por Tutikian (2004). Nota-se que os três primeiros passos são idênticos aos do Método IPT/EPUSP, que serviu de base para o desenvolvimento da metodologia de dosagem. A utilização do aditivo superplastificante e, principalmente, o acerto de finos por substituição são os principais passos do Método proposto por Tutikian (2004) por serem os determinantes para criar as características desejadas no CAA. O Método indica os passos:

1. Escolha dos materiais;
2. Determinação do teor ideal de argamassa seca;
3. Determinação dos traços rico, intermediário e pobre;
4. Colocação do aditivo superplastificante e consequente segregação;
5. Acerto dos finos por substituição;
6. Ensaio de Trabalhabilidade até o CC virar CAA;
7. Comparação do CAA com e sem VMA;
8. Ensaio de resistência à compressão nas idades determinadas;
9. Desenho do Diagrama de Dosagem.

O passo 5 tem como objetivo dar coesão ao concreto. Nesta pesquisa realizou-se substituição por finos não pozolânicos e, também, a utilização de aditivo modificador de viscosidade com esta finalidade.

O passo 7 do método não foi contemplado, visto que não foram produzidos CAA com finos e VMA no mesmo traço como foi realizado por Tutikian (2004) com o objetivo de comparação de custo global por m³.

3.3.3 Determinação do teor de argamassa

A determinação do teor de argamassa teve como base o concreto convencional intermediário de traço 1:5; conseqüentemente, apenas cimento, agregados e água foram utilizados nessa etapa, não sendo acrescentados finos ou aditivos. Iniciou-se o procedimento com 50% de argamassa, e os acréscimos foram efetuados conforme se fez necessário. Atingiu-se o teor de argamassa seca, em massa, de 56% como sendo o ideal para os materiais utilizados. Salienta-se que o valor de 56% é bastante próximo do valor de 55% encontrado na Etapa preliminar.

A determinação do teor de argamassa ideal ocorreu de forma visual observando-se aspectos de acabamento, homogeneidade e presença de agregados graúdos, sendo complementada por procedimentos práticos realizados com a betoneira desligada, observando-se também a homogeneidade e segregação.

Tendo em vista a necessidade de produção de concretos autoadensáveis de dois tipos com base no teor de argamassa determinado, decidiu-se acrescentar 2% ao teor de argamassa determinado, adotando-se o valor de 58%. Essa decisão baseia-se na possibilidade de perda de argamassa em casos reais, decorrentes da mistura ou do transporte do concreto, e principalmente da probabilidade de se produzir melhores concretos autoadensáveis buscando garantir a viabilidade da manutenção do mesmo teor de argamassa para todos os traços da pesquisa.

A Tabela 18 contém a dosagem do concreto convencional de traço intermediário por meio do acréscimo de areia e cimento, que é concluída quando se obtém o teor de argamassa ideal. O teor de argamassa adotado foi de 58% para todos os traços produzidos na pesquisa.

Tabela 18: Dosagem do traço seco em massa de concreto convencional traço 1:5

Teor	Traço Unitário (c:a:b)			Cimento (kg)		Areia (kg)		Brita (kg)
				Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total
0,50	1	2,00	3,00	36,67	-	73,33	-	110,00
0,51	1	2,06	2,94	37,41	0,748	77,07	3,74	110,00
0,52	1	2,12	2,88	38,19	0,779	80,97	3,90	110,00
0,53	1	2,18	2,82	39,01	0,813	85,04	4,06	110,00
0,54	1	2,24	2,76	39,86	0,848	89,28	4,24	110,00
0,55	1	2,30	2,70	40,74	0,886	93,70	4,43	110,00
0,56	1	2,36	2,64	41,67	0,926	98,33	4,63	110,00
0,57	1	2,42	2,58	42,64	0,969	103,18	4,84	110,00
0,58	1	2,48	2,52	43,65	1,015	108,25	5,08	110,00
0,59	1	2,54	2,46	44,72	1,065	113,58	5,32	110,00
0,60	1	2,60	2,40	45,83	1,118	119,17	5,59	110,00

(fonte: elaborado pelo autor)

3.3.4 Processo de mistura

A mistura dos materiais foi realizada em betoneira intermitente de queda livre com eixo inclinado. A dosagem foi expressa em massa. Após a imprimação da betoneira foi adotada a seguinte ordem de adição dos materiais:

1. Agregado graúdo;
2. Aproximadamente 2/3 da água de amassamento;
3. Cimento;
4. Agregado miúdo;
5. Restante da água de amassamento.

A dosagem segue quando o concreto em questão for autoadensável com aditivos superplastificante e modificador de viscosidade:

6. Aditivo superplastificante até a segregação;
7. Aditivo modificador de viscosidade.

Quando o concreto for autoadensável com substituição de finos não pozolânicos procede-se inicialmente da mesma forma com o aditivo superplastificante:

6. Aditivo superplastificante até a segregação;
7. Finos não pozolânicos, cimento, brita e água.

A adição de finos não pozolânicos ocorre como substituição ao agregado miúdo, desta forma, são acrescentados cimento e brita nas proporções correspondentes, a fim de preservar as proporções entre os materiais.

Ao final da mistura deve-se proceder com os ensaios de caracterização no estado fresco, que são detalhados no item 3.4.

3.3.5 Moldagem dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm. Os moldes utilizados são de aço com altura igual ao dobro do diâmetro. Os moldes foram revestidos com uma fina camada de óleo mineral. Os corpos de prova foram moldados conforme procedimento descrito na NBR 5738 (ABNT, 2015a), sendo os de concreto convencional vibrados mecanicamente, enquanto os autoadensáveis, naturalmente, não sofreram adensamento.

3.3.6 Cura

A desforma ocorreu 24 horas após a moldagem. Todos os corpos de prova foram então introduzidos na câmara úmida com temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa superior a 95%, onde permaneceram por um período de 7 dias.

Após esse período de 7 dias, os CPs que gerariam os dados das curvas de dosagem permaneceram na câmara úmida; enquanto aqueles que seriam aquecidos ao final do sazonalamento foram transferidos para a câmara climatizada, descrita no item a seguir.

3.3.7 Sazonamento

Visto que os corpos de prova seriam expostos a altas temperaturas e considerando as grandes chances de ocorrer *spalling* explosivo devido ao refinamento dos poros, os corpos de prova passaram por um período de armazenagem em condições especiais em câmara climatizada por mais 63 dias sob condições de temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 50%, a fim de

que fossem reduzidos os teores de umidade interna, contribuindo para evitar a perda de corpos de prova por *spalling* durante o aquecimento em altas temperaturas.

3.4 Caracterização no estado fresco

Para fins desta pesquisa, foram realizados três ensaios para avaliar as características dos concretos autoadensáveis no estado fresco, conforme descrito na sequência. As características do concreto convencional no estado fresco foram avaliadas por meio do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (ABNT, 2020b).

3.4.1 Classe de consistência do concreto convencional

A consistência do concreto convencional é determinada pelo método do abatimento do tronco de cone, método tradicional e consagrado, também conhecido como método do cone de Abrams ou *slump test*. O ensaio é realizado de acordo com a NBR 16899 (ABNT, 2020b), a fim de se garantir que seja plástico e coeso, além de determinar a classe de consistência.

A amostra para o ensaio pode ser retirada logo após a homogeneização do concreto, conforme NBR 16886 (ABNT, 2020a), dado o volume produzido em betoneira estacionária. A NBR 8953 (ABNT, 2015b) prevê classificações de acordo com faixas de medida de abatimento, fazendo as correspondências com aplicações típicas em função da consistência.

3.4.2 Slump-flow Test (Slump-flow Spread)

O *slump-flow test* é usado para determinar a capacidade de fluir horizontalmente sem segregar, na ausência de obstruções. Seu desenvolvimento deu-se no Japão e tinha como objeto de análise concretos submersos. Esse teste baseia-se no teste *Slump* padrão para concretos convencionais (EFNARC, 2002; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Os equipamentos obrigatórios para o ensaio estão representados na Figura 17. O cone deve ser preenchido com concreto e não se deve proceder com qualquer tipo de adensamento, o qual deve ocorrer apenas pela gravidade. Ao se remover o cone, o concreto flui livremente, formando aproximadamente um círculo, do qual são medidos dois diâmetros perpendiculares, da média dos valores obtém-se o resultado do ensaio.

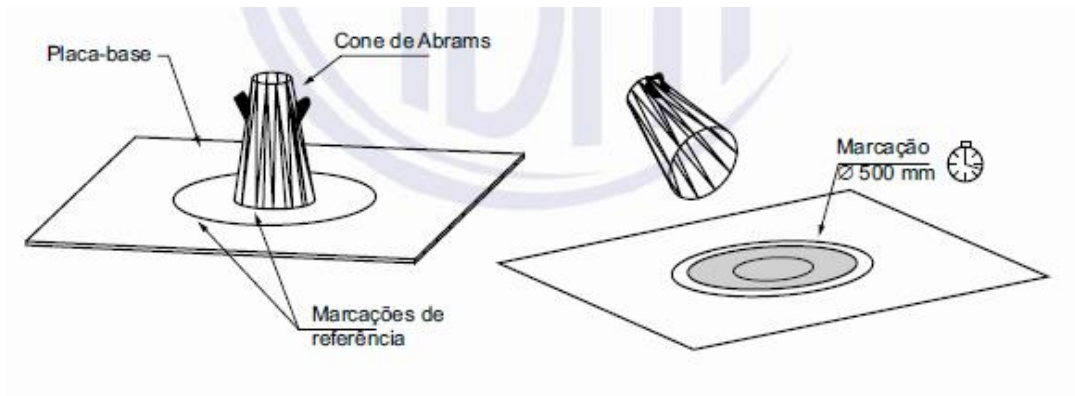
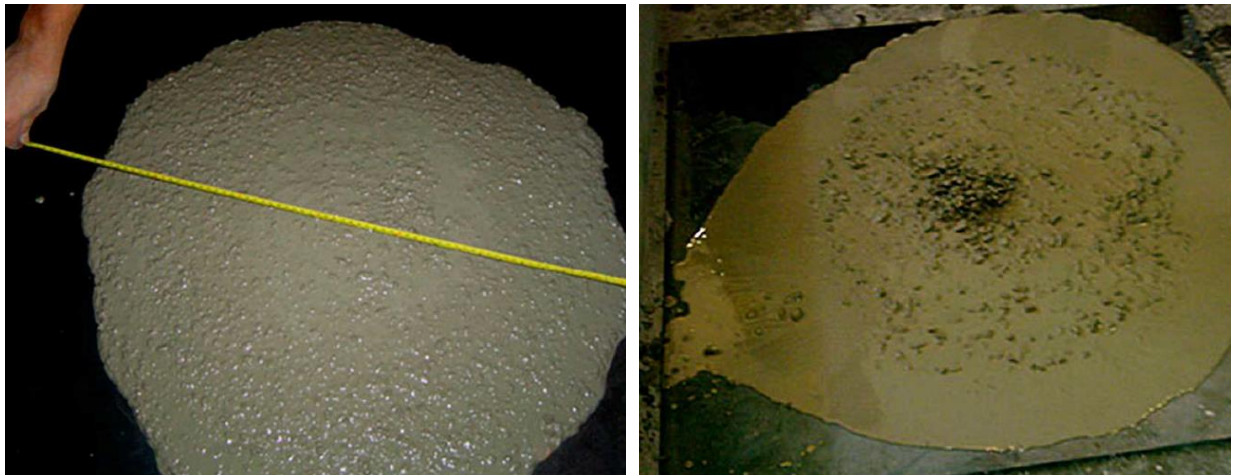


Figura 17: Equipamentos para realização de *slump-flow test*

(fonte: ABNT, 2017)

O ensaio possibilita também a observação visual de ocorrência de segregação, conforme mostrado na Figura 18.



(a)

(b)

Figura 18: (a) CAA sem segregação; (b) CAA com segregação

(fonte: TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008)

A NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) em sua Tabela 1 prevê espalhamentos entre 550 e 850 mm, separando-os em três classes recomendadas para diferentes tipos de aplicação. Os resultados do teste que caracterizam um concreto autoadensável, embora semelhantes, variam conforme as referências. Alguns limites são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19: Limites de resultados para o *slump-flow test*

Referências	Espalhamento (mm)	
	Mínimo	Máximo
EFNARC (2002)	650	800
Gomes (2002)	600	700
Gomes <i>et al.</i> (2003a)	600	750
Araujo <i>et al.</i> (2003)	650	800
Rigueira Victor <i>et al.</i> (2003)	600	800
Barbosa <i>et al.</i> (2002)	550	700
Peterssen (1999)	650	725
Tviksta (2000)	600	-
Coppola (2000)	600	750
Palma (2001)	650	750

(fonte: TUTIKIAN, 2007)

Esse ensaio permite também a classificação quanto ao IEV (índice de estabilidade visual), que avalia a distribuição dos agregados graúdos na mistura, distribuição de argamassa no perímetro e exsudação. As classificações e descrições são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Classes de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre)

IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação
IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação
IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto
IEV 3	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)

(fonte: ABNT, 2017a)

3.4.3 T50 Test (Slump-Flow Time)

O ensaio *T50 Test* é uma variação do *Slump-flow Test*, por esse motivo também é chamado *Slump-flow Time*, e caracteriza-se como uma determinação secundária e complementar da fluidez. A diferença entre os testes é que neste desenha-se um círculo de diâmetro igual a 500

mm centrado no centro da base metálica, ver Figura 19, sobre o qual deverá estar alinhado também o cone ao ser preenchido.

São necessárias duas pessoas, visto que enquanto uma delas retira o cone, a outra deve realizar o acionamento do cronômetro. O resultado do teste é o tempo medido para que o concreto atinja a linha desenhada.



Figura 19: T50 Test (*Slump-flow Time*)

(fonte: TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008)

O EFNARC (2002) comenta que valores entre 3 e 7 segundos são aceitáveis para obras especiais, enquanto valores de 2 a 5 segundos são aceitáveis para obras de edificações. Já a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a) classifica em duas classes de viscosidade plástica aparente, VS 1 para valores menores do que 2 segundos e VS 2 para valores maiores do que 2 segundos.

3.4.4 Massa específica no estado fresco

A massa específica no estado fresco foi determinada por diferença de massa utilizando-se três fôrmas de corpos de prova pesadas previamente à concretagem. Após a produção do concreto, preenchimento das formas e posterior rasamento, procedeu-se novamente com a pesagem, a fim de se obter a massa de concreto utilizada. No tocante ao volume, considerou-se o valor teórico para as fôrmas padrão de 10x20cm utilizadas.

3.5 Caracterização no estado endurecido

3.5.1 Resistência à compressão

O ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos permite determinar sua resistência à compressão, esse valor não permite apenas a classificação pelo grupo de resistência para fins estruturais, conforme prevê a NBR 8953 (ABNT, 2015b). Usualmente também serve como parâmetro da qualidade do material, conforme texto da NBR 6118 (ABNT, 2014), que indica uma forte correspondência entre a relação água/cimento e a resistência à compressão do concreto e sua durabilidade.

Todos os ensaios foram realizados em prensa hidráulica da marca Shimadzu, com capacidade de 2.000 kN e monitoramento computacional. Os procedimentos de ensaio adotados seguiram as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018b).

3.5.2 Módulo de elasticidade

O procedimento adotado para a determinação do módulo de elasticidade foi o descrito pela NBR 8522 (ABNT, 2017b), adotando-se o Método da Tensão Fixa. O método determina o módulo de elasticidade ou módulo de deformação tangente à origem ou inicial, considerado equivalente ao módulo de deformação secante entre a tensão de 0,5 MPa (fixa) e 30% de f_c .

Os corpos de prova foram instrumentados com 2 transdutores de deslocamento do tipo *Linear Variable Differential Transformer (LVDT)*, conforme mostra a Figura 20. As medições de carga e de deformação específica foram registradas pelo software *Catman Easy*.



Figura 20: Ensaio do módulo estático de elasticidade

(fonte: elaborado pelo autor)

Visto que a NBR 15200 (ABNT, 2004) foi substituída, tornando-se complicado o acesso a seus dados, sendo que a versão vigente hoje é a NBR 15200 (ABNT, 2012), apresenta-se a Tabela 21 com os fatores de redução da referida versão antiga da norma. Embora as relações para a resistência sejam as mesmas da versão atual da norma, elas também são apresentadas com o intuito de evidenciar a redução mais acentuada do módulo de elasticidade em relação à resistência à compressão a partir dos 100°C.

Tabela 21: Valores das relações $f_{c,\theta}/f_{c,k}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos de massa específica normal

Temperatura	NBR 15200 (ABNT, 2004)	
θ	Agregado Silicoso	
°C	$E_{c,\theta}/E_c$	$f_{c,\theta}/f_{c,k}$
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,94	0,95
300	0,83	0,85
400	0,72	0,75
500	0,55	0,60
600	0,36	0,45
700	0,19	0,30
800	0,07	0,15
900	0,00	0,08
1000	0,00	0,04
1100	0,00	0,01
1200	0,00	0,00

(fonte: adaptado de ABNT, 2004)

Sendo:

$f_{c,\theta}$ – resistência à compressão do concreto na temperatura θ ;

$f_{c,k}$ – resistência característica à compressão do concreto em situação normal;

$E_{c,\theta}$ – módulo de elasticidade do concreto submetido a diferentes temperaturas;

E_c – módulo de elasticidade do concreto em situação normal.

3.5.3 Perda de massa

O método para quantificação da perda de massa consistiu em se pesar semanalmente todos os corpos de prova em temperatura ambiente durante cura e sazonalidade, antes do aquecimento e após o aquecimento. A perda de massa foi expressa em porcentagem, sendo calculada pela divisão da diferença da massa inicial e final com a massa inicial.

Foram plotados os valores em função das temperaturas e avaliados os intervalos em que os aquecimentos geraram as maiores variações. Relacionou-se a perda de massa com as temperaturas de exposição a fim de correlacionar as causas de sua variação, sendo possível associar as variações principalmente à perda de água, mas também às reações ocorridas nos constituintes do concreto.

3.5.4 Avaliação visual de cor e *spalling*

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002) afirma que a inspeção visual é provavelmente o mais relevante dos ensaios não destrutivos, sendo importante que o engenheiro seja capaz de identificar e interpretar os sinais observados, pois são indicativos da condição da estrutura, permitindo que se formule um programa de ensaios mais assertivo.

Entre os sinais podem ser citados: rachaduras, saliências, fragmentação, desintegração, manchas, falta de uniformidade e mudança de cor. Sendo esta última, um indicador amplamente reconhecido da extensão dos danos causados pelo fogo (IAEA, 2002), embora sua aplicação ainda deva ser usada com cautela.

A ocorrência de alterações de cor, deslocamentos e *spalling* explosivo foi avaliada de forma visual. A verificação dos fenômenos foi registrada por meio de imagens que permitam a visualização desses pontos, possibilitando mensurar sua intensidade.

3.5.5 Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU)

O ensaio de velocidade de pulso ultrassônico é um ensaio não destrutivo, no qual é determinada indiretamente a velocidade de propagação de uma onda ultrassônica no interior de um corpo, permitindo avaliar sua compacidade e homogeneidade.

O ensaio foi realizado considerando os procedimentos da NBR 8802 (ABNT, 2019). Avaliaram-se os corpos de prova submetidos a altas temperaturas antes e depois da exposição às altas temperaturas. O objetivo é avaliar o impacto da temperatura na qualidade residual do concreto por meio da mensuração da variação da velocidade e interpretação dos resultados. Espera-se que para temperaturas maiores haja, além da perda de água, um incremento na microfissuração, ocorrência que impacta na diminuição da VPU. A presença de vazios causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do som no ar (LORENZI *et al.*, 2009).

Tendo em vista que o resultado apresentado pelo equipamento é uma medida do tempo decorrido entre a emissão e a recepção do pulso, tendo-se registrados os comprimentos dos corpos de prova, converte-se o tempo em velocidade.

O guia TCS-17, publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002), aponta como principais aplicações do VPU a determinação da variabilidade e qualidade do concreto por meio da medição da velocidade de pulso, conforme especificações da Tabela 22. De acordo com a publicação, o método permite determinar a extensão de defeitos como vazios, falhas de concretagem, fissuras e segregação. Também destaca que a técnica é útil ao se examinar concreto danificado pelo fogo.

Tabela 22: Qualidade do concreto em função da VPU

Velocidade (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	excelente
3500 a 4500	ótimo / bom
3000 a 3500	bom
2000 a 3000	regular
< 2000	ruim

(fonte: adaptado de IAEA, 2002)

Ohdaira e Masuzawa (2000) investigaram o teor de umidade do concreto e seu efeito sobre a velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. Para isso produziram corpos de prova cilíndricos 10x20cm, os quais foram submersos em água por 50 dias buscando-se a saturação. Após esse período foram colocados em câmara seca e tiveram suas massas controladas, o teor de umidade variou de 8% até 0%. Ao ensaiar os corpos de prova em diferentes idades, logo com diferentes umidades, concluíram que as velocidades obtidas variaram proporcionalmente ao teor de umidade.

A ASTM (*American Society for Testing and Materials*) E114-15 recomenda que as superfícies devem ser uniformes, planas e contínuas, ou seja, sem buracos, ranhuras, tintas ou quaisquer materiais incrustados, bem como qualquer tipo de sujeira, pois a presença de materiais estranhos afeta os resultados do ensaio. A norma também permite que sejam

preparadas as superfícies, a fim de se obter as características necessárias, podendo ser lixadas, esmerilhadas, entre outras formas.

Os transdutores utilizados trabalham com frequência de 54 kHz, valor recomendado para a maioria das aplicações em concreto, segundo a *Screening Eagle Technologies* (2021), a qual informa que frequências maiores possuem maior capacidade de resolução, mas perdem em penetração, enquanto frequências menores tem maior capacidade de penetração, mas menor resolução.

Para a pesquisa, todos os corpos de prova cilíndricos têm suas superfícies retificadas e paralelas, esse preparo realizado para que possam gerar resultados confiáveis quando ensaiados na prensa hidráulica, garante a planicidade das faces necessária para a realização do ensaio de ultrassom.

A ASTM E114 – 95 recomenda que se registrem informações referentes ao equipamento, Tabela 23; parâmetros utilizados durante os ensaios, Tabela 24; dados de entrada, unidades de saída, meio acoplante, entre outros, ver Tabela 25.

Tabela 23: VPU – Equipamento de ultrassom

Marca	Proceq
Modelo	Pundit Lab
Ano	2011
Transdutores	2 (54 kHz)
Alimentação	Elétrico USB
Número de Série	PL01-0002-0119
Versão do Hardware	PL80-0002-0119
Versão do Software	2.4.0
Tipo de Cabo	BNC (Bayonet Neill Concelman)
Comprimento dos Cabos	variável
Amostra mínima	69 mm
Faixa de Medição	até 15 m

(fonte: elaborado pelo autor)

Os dados apresentados na Tabela 24 vão ao encontro do que recomenda a ASTM E114-95 no que se refere aos dados necessários para que se possa replicar o ensaio.

Tabela 24: VPU - Parâmetros do Sistema

Frequência de Transmissão	54 kHz
Calibração	Bloco de Calibração 25 μ s (710 10 028)
Largura de Pulso	9,3 μ s
Resolução	0,1 μ s
Estágio de Ganho Integrado	10x
Pulso Energizante	500V

(fonte: elaborado pelo autor)

A VPU pode ser afetada por diversos fatores, dois fatores determinantes são o teor de umidade do material e a temperatura na qual ele se encontra durante os ensaios. Conforme orientações do manual de equipamento da PROCEQ, o fator de correção adotado para a temperatura é de 1, ou seja, sem correção, o qual é indicado para concretos em ambas as condições, seco ou molhado, para temperaturas entre 10°C e 30°C, faixa na qual foram realizados os ensaios.

Tabela 25: VPU - Outras Informações

Dados de Entrada	
Comprimento do CP (m)	0,190
Correção da Temperatura	1
Unidades de Saída	
Tempo	μ s
Velocidade	m/s
Outras Informações	
Acoplamento	Gel Clínico para Ultrassom - Marca RMC
Digitalização	Manual

(fonte: elaborado pelo autor)

3.5.6 Difração de Raios-X (DR-X)

O ensaio de Difração de Raios-X será utilizado para identificação de compostos cristalinos presentes. A diferença entre materiais cristalinos ou amorfos é a organização das estruturas atômicas ou moleculares, sendo que os amorfos não possuem um arranjo regular e sistemático. A organização de vários grãos (cristais), embora de maneira desorganizada, em grande quantidade garante a orientação de algumas partículas de tal forma que todos os conjuntos cristalográficos estejam disponíveis para a difração. A difração por sua vez ocorre quando um grande número de ondas dispersas se reforça, após encontrar um obstáculo, desde

que a relação entre o comprimento da onda de raios-X seja proporcional ao espaçamento interatômico (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013).

Ao se aplicar a técnica no material não aquecido e também nos materiais expostos aos diferentes patamares de aquecimento, é possível identificar as variações ocorridas na quantidade ou presença dos diferentes compostos químicos em função de suas estruturas cristalinas. Gráficos típicos resultantes deste tipo de ensaio podem ser vistos na Figura 21.

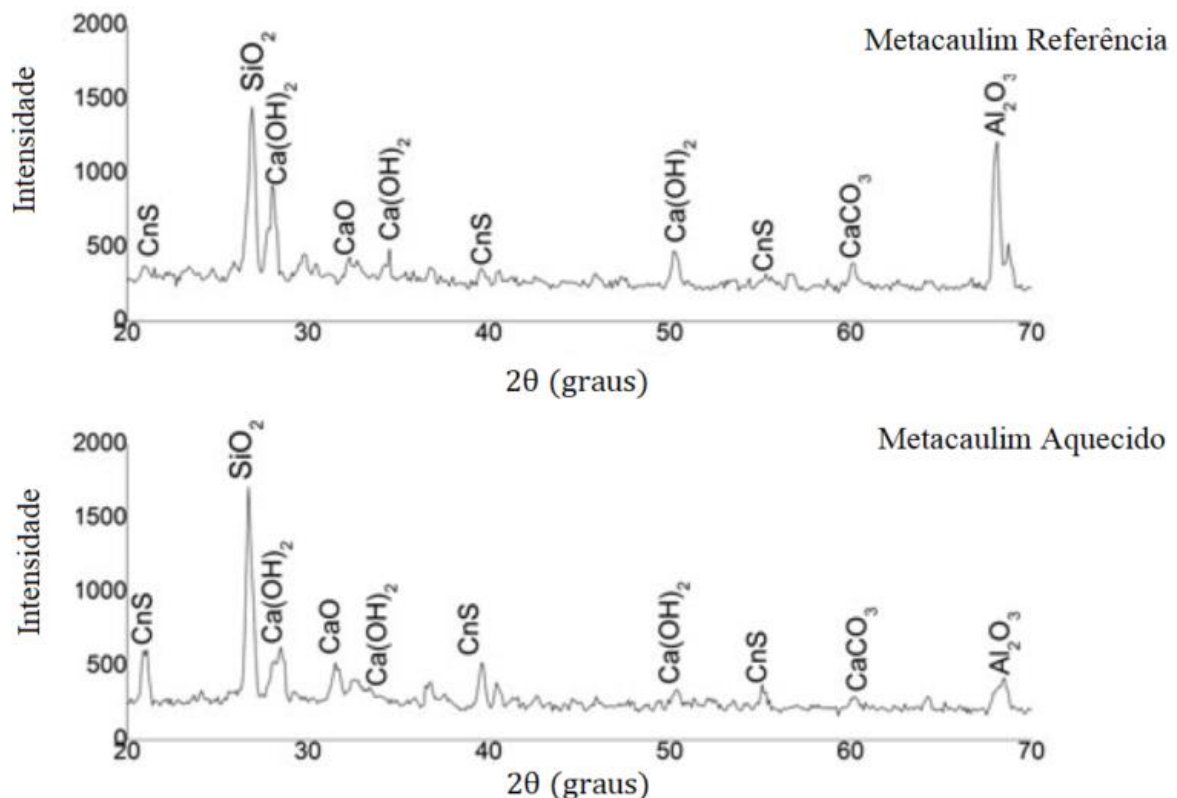


Figura 21: Investigação com Difração de Raios-X (a) CP referência com metacaulim
(b) CP Aquecido com metacaulim

(fonte: ANAND *et al.*, 2016)

Foram coletadas amostras de CPs após a ruptura com a finalidade de observar as variações ocorridas na composição química dos concretos, de acordo com as temperaturas atingidas durante a exposição aos diferentes patamares.

Primeiramente utilizou-se furadeira de bancada com broca para concreto a fim de produzir material pulverulento, que então foi peneirado em malha de #325 *mesh* e armazenado em recipientes fechados para que se evitasse reações químicas com os elementos presentes no ar.

As amostras foram ensaiadas no LACER, o equipamento utilizado foi um Difratorômetro de Raios-X, marca Phillips, modelo X'Pert MDP (tubo de Raios-X com radiação Cu K α), para isso foram adotadas as condições padrão de análise:

- $2\theta - 5$ a 75° ;
- $0,05^\circ/1s$;
- Fendas (*slits*) – $1/2^\circ$;
- Janela (*window*) – 20 mm;
- Programa: padrão;
- Duração: 23 minutos.

Os resultados foram analisados no *software* X'Pert HighScore Plus, versão 2.0. O método utilizado foi a identificação automática dos picos cristalinos presentes na amostra, e posterior comparação com os padrões de referência existentes no banco de dados do programa. A análise não se restringiu apenas à equivalência de picos entre amostra e padrão de referência, visto que diferentes materiais podem apresentar ângulos de difração que se sobrepõem, mas também à identificação dos principais ângulos conhecidos para cada composto. Buscou-se identificar os compostos conhecidamente presentes no concreto, levando-se em consideração a possibilidade de correta identificação baseada não apenas nos padrões difratométricos encontrados no *software*, mas considerando-se as identificações existentes na literatura técnica.

Os compostos identificados nos difratogramas foram escolhidos com base na possibilidade de serem utilizados como indicadores de degradação térmica, ou seja, em função de sua variação de intensidade após expostos a diferentes temperaturas. Com o aumento da temperatura ocorre a degradação e até extinção de alguns compostos, o que implica na diminuição de alguns picos; entretanto, é importante destacar que essas mesmas reações apresentam novos compostos como produtos, o que implica no surgimento ou aumento de outros materiais, consequentemente novos picos.

Ressalta-se que o objetivo desta análise não é identificar, tampouco a quantificar todos os picos, mas sim relacionar as alterações ocorridas na composição do concreto como consequência da ação térmica sobre a sua estrutura química.

Vale destacar também, que pequena variação entre os ângulos pode ocorrer entre as diversas fontes. Essas variações não são encontradas apenas nas amostras ensaiadas nesta pesquisa, mas também nas próprias referências fornecidas pelo banco de dados do *software*. Outro indicador que pode ser utilizado e é apresentado por alguns autores como Castellote *et al.* (2004) são os três índices de Miller na forma $(h\ k\ l)$, índices inteiros não separados por vírgulas, notação utilizada em cristalografia para identificar coordenadas em uma rede de Bravais (CALLISTER JUNIOR; RETHWISCH, 2013).

4 ETAPA PRELIMINAR

A etapa preliminar consiste na determinação das temperaturas necessárias e períodos de homogeneização das temperaturas, por meio de simulação dos aquecimentos que seriam realizados posteriormente no âmbito da pesquisa. Na presente etapa, entretanto, os aquecimentos foram realizados com corpos de prova moldados com tubos de cobre inseridos em seu interior, de forma a permitir a inserção de termopares. Neste capítulo são descritos os resultados dos procedimentos de concretagem e aquecimentos para a calibração do forno.

4.1 Concretagem e sazonalamento

Os corpos de prova foram moldados com tubos de cobre inseridos em seus interiores, os quais foram posicionados de forma a permitir a inserção de termopares até o centro geométrico do cilindro, conforme Figura 22.

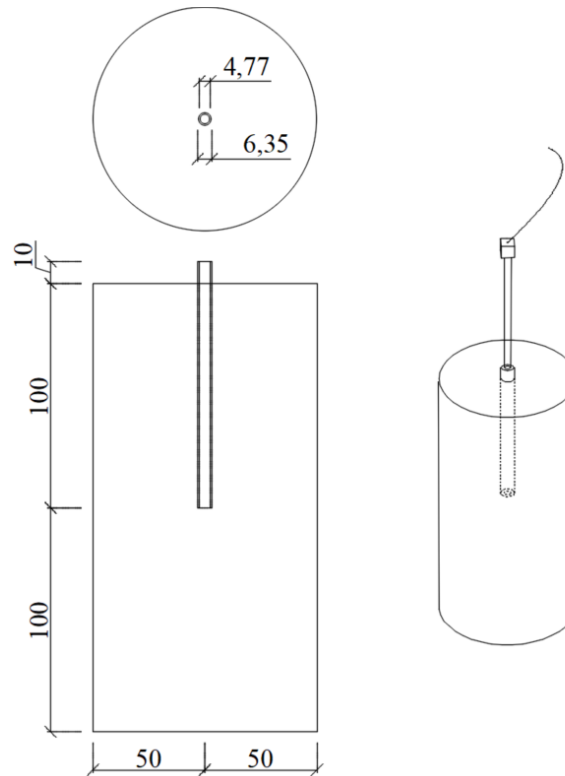


Figura 22: Vistas do corpo de prova (medidas em milímetros) com tubo de cobre e representação 3D com termopar inserido

(fonte: elaborado pelo autor)

De maneira que o tubo não sofresse alterações de posicionamento durante a concretagem, foram confeccionados suportes metálicos de arame, os quais foram afixados aos tubos com a aplicação de cola quente. Após o preenchimento das formas dos corpos de prova e realizado o adensamento do concreto, os tubos de cobre com os suportes foram inseridos verticalmente no centro do material ainda fresco, conforme Figura 23.



Figura 23: Concretagem de corpos de prova com tubos de cobre

(fonte: elaborado pelo autor)

Optou-se por utilizar, para esta etapa da pesquisa, o traço intermediário 1:5, apresentado na Tabela 26. As características do concreto produzido para esta etapa são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 26: Traço em massa do CC 1:5 da etapa de calibração do forno

Teor	Traço Unitário (c:a:b)		Cimento (kg)		Areia (kg)		Brita (kg)		
			Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	
0,50	1	2,00	3,00	15,00		30,00		45,00	-
0,51	1	2,06	2,94	15,31	0,31	31,53	1,53	45,00	-
0,52	1	2,12	2,88	15,63	0,32	33,13	1,59	45,00	-
0,53	1	2,18	2,82	15,96	0,33	34,79	1,66	45,00	-
0,54	1	2,24	2,76	16,30	0,35	36,52	1,73	45,00	-
0,55	1	2,30	2,70	16,67	0,36	38,33	1,81	45,00	-
0,56	1	2,36	2,64	17,05	0,38	40,23	1,89	45,00	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 27: Características do concreto da etapa de calibração do forno

a/c	0,59
$Slump$ (mm)	160
Densidade no estado fresco (g/cm^3)	2,42
Densidade média (g/cm^3)	2,28
f_{cm} (28 dias)	38,96
$E_{ci,m}$ (GPa)	22,1

(fonte: elaborado pelo autor)

Para esta etapa da pesquisa foram moldados 26 corpos de prova, dos quais 12 com tubos de cobre e 14 sem tubos de cobre. Todos os corpos de prova foram curados por 7 dias em câmara úmida. Após esse período, os 26 corpos de prova foram realocados e mantidos sob temperatura constante de 105°C até que atingida a constância de massa. Dois exemplares permaneceram sob essas condições até os 28 dias, idade na qual foram rompidos para que fossem obtidos os dados de resistência à compressão aos 28 dias.

Os 24 corpos de prova atingiram a constância de massa em 20 dias e perderam em média 5,50% de massa no período de 34 dias. Os dados utilizados para a determinação das perdas de massa estão na Figura 24.

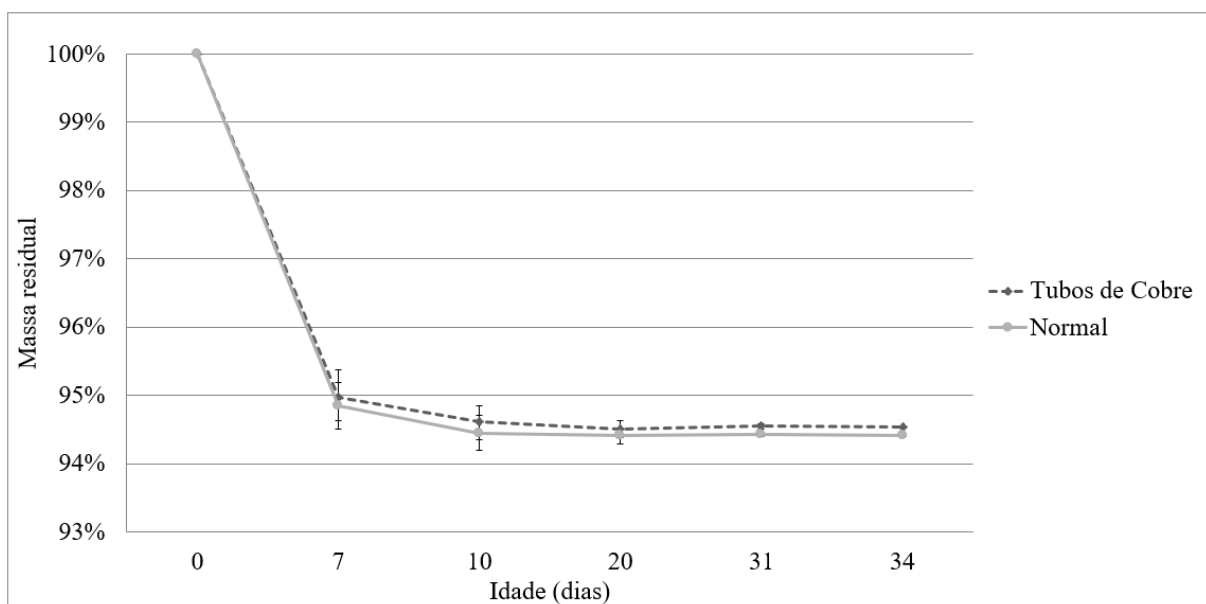


Figura 24: Variação de massa nos corpos de prova utilizados para calibração do forno

(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 Aquecimento para calibração dos tempos de aquecimento

Após completado o sazonalamento dos corpos de prova da etapa preliminar da pesquisa, procedeu-se com o posicionamento das unidades dentro do forno, inserção dos termopares nos tubos de cobre, programação do forno para as diferentes temperaturas e instalação do coletor de dados (*field logger*).

O forno utilizado é da marca Sanchis, com capacidade para atingir 1300°C, configurável para atingir a taxa de aquecimento lento de 1°C/min, conforme recomendação do RILEM (1995), apresentada na Tabela 15. Os termopares utilizados são do Tipo K, com faixa de medição entre -90°C e 1200°C. O intervalo base entre aquisições foi de 5 segundos, o qual permite aproximadamente 30 horas de coleta com 6 canais ativos para o equipamento utilizado.

Buscando avaliar não apenas a diferença entre a temperatura registrada pelo *display* do forno e aquela medida no centro do equipamento em região inferior, ou seja, próxima à base dos corpos de prova durante o aquecimento, mas também registrar a evolução real da temperatura que é influenciada pela histerese do controlador de temperatura, inseriu-se um termopar por orifício específico na parte superior do forno durante o aquecimento de 600°C. O comparativo entre evolução teórica e real da temperatura do forno é apresentado na Figura 25, onde a temperatura teórica é representada em preto, enquanto a registrada pelo termopar é representada em cinza.

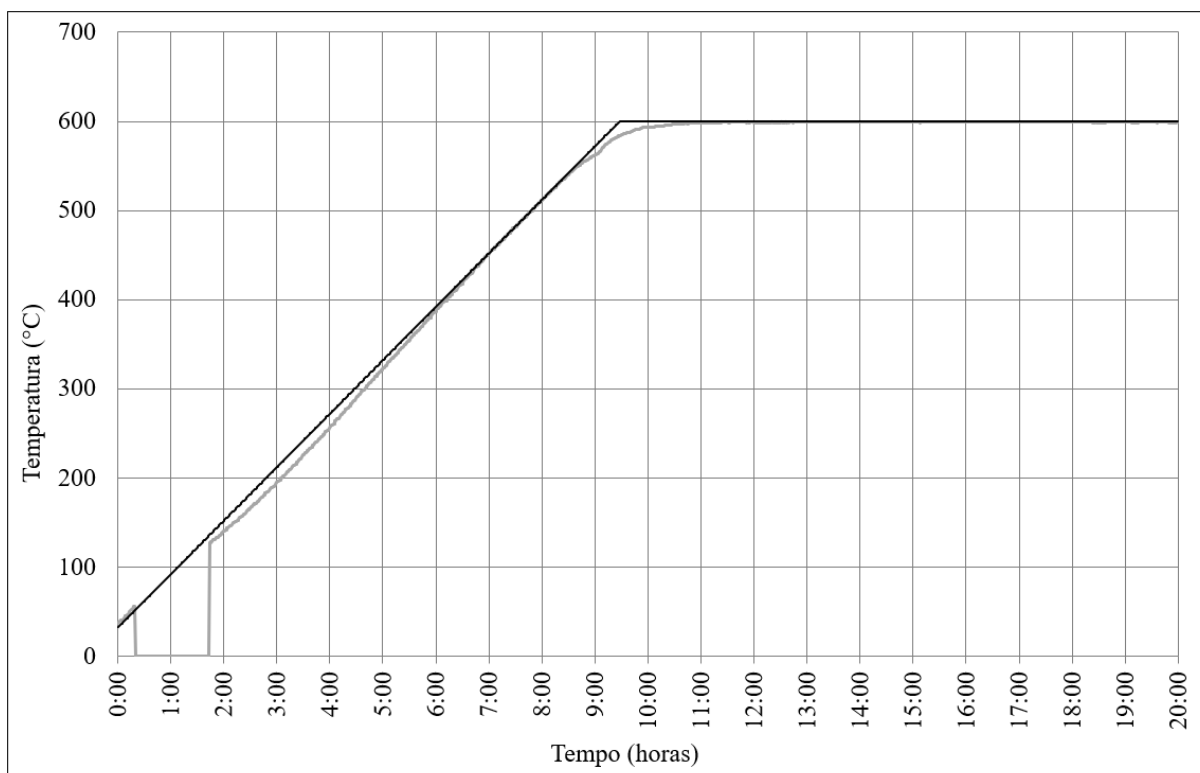


Figura 25: Comparativo entre evolução teórica e real da temperatura do forno

(fonte: elaborado pelo autor)

A calibração dos tempos de aquecimento iniciou-se com a temperatura mais baixa, 200°C. Após os aquecimentos de 400°C e 600°C confirmou-se o seguinte padrão: apesar de o indicador do forno apresentar o valor da temperatura alvo, essa temperatura não era alcançada no interior dos corpos de prova, no qual estava sempre abaixo do esperado. Esse fato foi associado ao posicionamento do termopar integrado ao forno, o qual é posicionado ao fundo e acima, em local mais próximo aos resistores do que o ocupado pelos corpos de prova.

Após essa constatação, procedeu-se com o acréscimo de 25°C à temperatura alvo inserida na programação do forno. Essa variação permitiu que se atingisse a temperatura desejada no interior dos corpos de prova. A evolução da temperatura teórica do forno é apresentada em preto contínuo na Figura 26, visto que a taxa de aquecimento é constante, são retas de coeficiente angular 1°C/min. As curvas cinzas tracejadas são medidas registradas pelos termopares, por isso podem apresentar ruídos em alguns pontos.

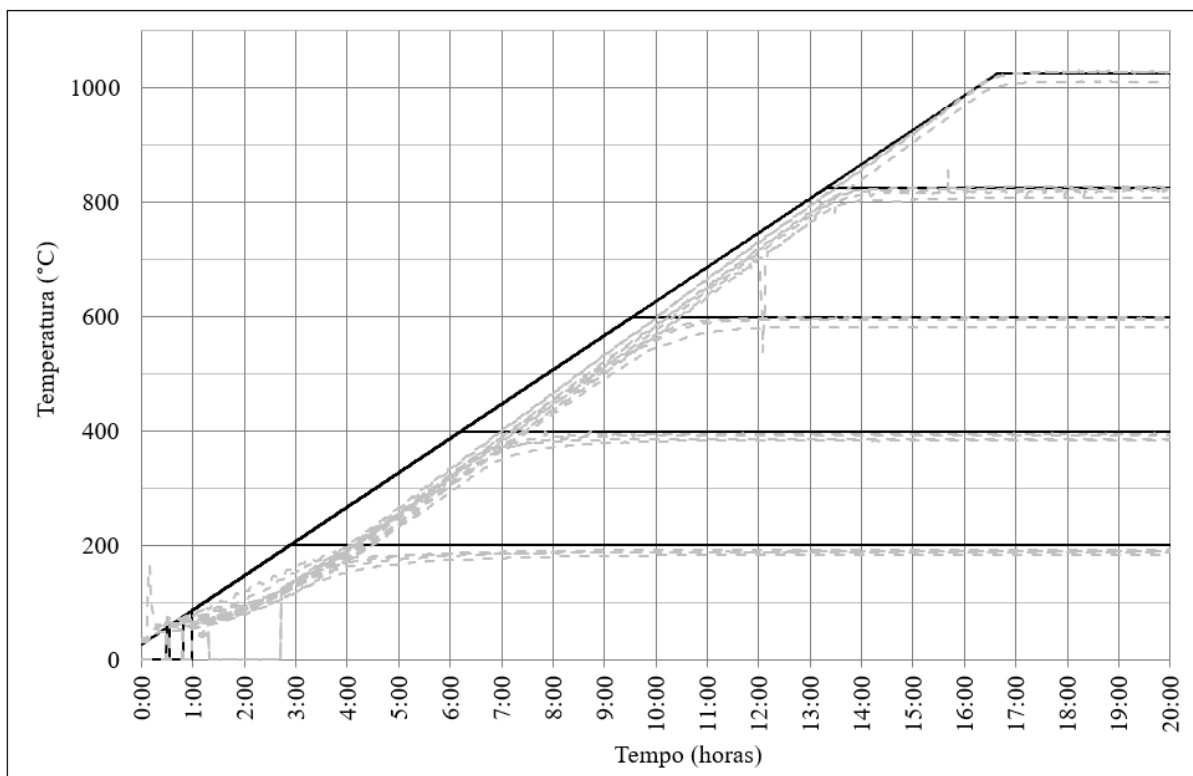


Figura 26: Evolução da temperatura do forno *versus* temperatura no interior dos corpos de prova

(fonte: elaborado pelo autor)

De forma geral é possível perceber taxas de elevação da temperatura no interior dos CPs menores nas primeiras duas horas e meia (aproximadamente) para todos os aquecimentos, o que gera um gradiente de temperatura maior entre o interior dos CPs e o interior forno. Esse comportamento pode estar parcialmente associado à inércia térmica do sistema, visto que os materiais do interior do forno também partem da temperatura ambiente e absorvem energia térmica até certo ponto, visto que são considerados isolantes térmicos. Após a estabilização da temperatura do equipamento, há a equalização da temperatura interna dos CPs com a temperatura do interior do forno, esse período é tanto menor quanto maior a temperatura. Esse fenômeno pode estar associado aos processos de transferência de calor, visto que a taxa com a qual um objeto emite calor por meio da radiação eletromagnética é função da sua temperatura. Quanto mais alta a temperatura do corpo aquecido, maior será a quantidade de calor transmitida por radiação (HALLIDAY *et al.*, 2012). Desta forma não apenas a condução de calor, mas também a irradiação térmica faz com que o período de estabilização seja menor.

Após avaliação dos dados, adotou-se o acréscimo de 25°C para todas as temperaturas alvo na programação do equipamento. Não foram repetidos os aquecimentos para as temperaturas de 225°C, 425°C e 625°C, devido à falta de termopares, pois durante os aquecimentos alguns pararam de funcionar, enquanto outros, que funcionaram até a temperatura mais alta, permaneceram acoplados aos tubos de cobre, impedindo sua reutilização.

Os tempos de aquecimento foram determinados com base na taxa de aquecimento partindo-se de uma temperatura de 20°C, adotada como padrão. Os tempos de homogeneização foram determinados com dados obtidos dos termopares. Decidiu-se adicionar 25°C a todas as temperaturas alvo nas programações do forno, buscando assim garantir que a temperatura desejada fosse atingida no interior dos CPs. Os tempos de homogeneização mensurados foram prolongados em aproximadamente trinta minutos. Os tempos adotados para cada etapa em função da temperatura são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Tempos de homogeneização das temperaturas

Tempos (horas)	Temperaturas				
	225°C	425°C	625°C	825°C	1025°C
Tempo de aquecimento	03:25	06:45	10:05	13:25	16:45
Tempo de homogeneização	06:44	04:56	03:47	01:41	00:04
Tempo de homogeneização adotado	07:15	05:30	04:20	02:15	00:35
Tempo total	10:40	12:15	14:25	15:40	17:20

(fonte: elaborado pelo autor)

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS PARA O PROJETO PRINCIPAL DE PESQUISA

5.1 Dosagem

Os traços calculados para o trabalho experimental foram determinados após a definição do teor de argamassa, fixado em 58%, para todos os concretos conforme 3.3.3. As proporções são indicadas na Tabela 29, na qual é possível visualizar a utilização de cada material em cada família produzida. No tocante aos concretos autoadensáveis, decidiu-se fixar também a relação água/cimento, a fim de reduzir o número de variáveis que interferissem nos resultados.

Tabela 29: Traços unitários secos em massa

Concretos	Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	SP	VMA	Areia Fina
CC	1:3,5	1,00	1,61	1,89	0,45	-	-	-
	1:5	1,00	2,48	2,52	0,59	-	-	-
	1:6,5	1,00	3,35	3,15	0,76	-	-	-
CAA VMA	1:3,5	1,00	1,61	1,89	0,45	0,4%	0,3%	-
	1:5	1,00	2,48	2,52	0,59	0,4%	0,3%	-
	1:6,5	1,00	3,35	3,15	0,76	0,8%	0,2%	-
CAA NP	1:3,5	1,00	1,31	1,89	0,45	0,4%	-	0,3
	1:5	1,00	2,28	2,52	0,59	0,6%	-	0,2
	1:6,5	1,00	2,95	3,15	0,76	0,8%	-	0,4

(fonte: elaborado pelo autor)

A dosagem do aditivo superplastificante foi realizada experimentalmente. Os acréscimos foram realizados sempre em porções de 0,1% da massa de aglomerantes utilizados, até que fosse perceptível uma maior fluidez da mistura enquanto a betoneira estivesse em funcionamento, e até que houvesse segregação do concreto com a submersão do agregado

graúdo quando a betoneira estivesse parada. A interrupção do acréscimo de aditivo superplastificante sempre ocorreu logo que o fenômeno se manifestou, de forma que o concreto, embora sofrendo segregação, apresentasse o agregado graúdo a poucos milímetros da superfície. Essa técnica permite a economia de materiais, visto que não há segregação além da necessária para a produção do concreto autoadensável, o que ocorre em seguida com a correção da coesão, seja ela realizada com aditivo modificador de viscosidade ou adição de finos.

O aditivo modificador de viscosidade também foi dosado experimentalmente, em acréscimos de 0,1% da massa de aglomerantes. Sua adição foi interrompida sempre que, visualmente, percebeu-se a correção da segregação com a betoneira desligada. Entretanto, em caso de não atendimento das propriedades desejadas nos ensaios de estado fresco, novas adições de 0,1% da massa de aglomerantes foram realizadas até que as propriedades fossem atingidas.

Sistemática semelhante foi adotada para as adições de finos não pozolânicos, adições ligeiramente mais complexas pelo fato de necessitarem de porções de areia fina, cimento, brita e água, a fim de manter as proporções em massa dos aglomerantes e agregados, e o teor de argamassa. A dosagem dessa forma permite que os concretos autoadensáveis possam ser comparados ao serem considerados da mesma família (TUTIKIAN, 2004).

Alencar e Helene (2006) destacam que quanto mais finas forem as adições, menores são os teores de substituição. Esse comportamento deve-se ao aumento da frequência de contato entre as partículas, o que influencia no aumento da viscosidade e coesão da mistura. Adicionalmente, quanto mais rica for a mistura, menores os teores necessários de substituição por adições, visto que essas misturas já apresentam maior quantidade de finos e, conseqüentemente, são mais coesas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Esse comportamento, embora com pequena variação, evidencia-se para as adições de areia fina nos CAA NP, conforme Tabela 29.

5.1.1 Traço seco em massa

As tabelas de dosagem completas com os traços secos em massa, 1:3,5; 1:5 e 1:6,5 dos CC e CAA VMA são apresentados respectivamente nas Tabela 30, Tabela 31 e Tabela 32, o traço utilizado está destacado.

Tabela 30: Traço em massa CC 1:3,5 e CAA VMA 1:3,5

Teor	Traço Unitário (c:a:b)			Cimento (kg)		Areia (kg)		Brita (kg)
				Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total
0,50	1	1,25	2,25	40,00	-	50,00	-	90,00
0,51	1	1,30	2,21	40,82	0,82	52,86	2,86	90,00
0,52	1	1,34	2,16	41,67	0,85	55,83	2,98	90,00
0,53	1	1,385	2,115	42,55	0,89	58,94	3,10	90,00
0,54	1	1,43	2,07	43,48	0,93	62,17	3,24	90,00
0,55	1	1,48	2,03	44,44	0,97	65,56	3,38	90,00
0,56	1	1,52	1,98	45,45	1,01	69,09	3,54	90,00
0,57	1	1,57	1,94	46,51	1,06	72,79	3,70	90,00
0,58	1	1,61	1,89	47,62	1,11	76,67	3,88	90,00
0,59	1	1,66	1,85	48,78	1,16	80,73	4,07	90,00
0,60	1	1,70	1,80	50,00	1,22	85,00	4,27	90,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 31: Traço em massa CC 1:5 e CAA VMA 1:5

Teor	Traço Unitário (c:a:b)			Cimento (kg)		Areia (kg)		Brita (kg)
				Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total
0,50	1	2,00	3,00	30,00	-	60,00	-	90,00
0,51	1	2,06	2,94	30,61	0,61	63,06	3,06	90,00
0,52	1	2,12	2,88	31,25	0,64	66,25	3,19	90,00
0,53	1	2,18	2,82	31,91	0,66	69,57	3,32	90,00
0,54	1	2,24	2,76	32,61	0,69	73,04	3,47	90,00
0,55	1	2,30	2,70	33,33	0,72	76,67	3,62	90,00
0,56	1	2,36	2,64	34,09	0,76	80,45	3,79	90,00
0,57	1	2,42	2,58	34,88	0,79	84,42	3,96	90,00
0,58	1	2,48	2,52	35,71	0,83	88,57	4,15	90,00
0,59	1	2,54	2,46	36,59	0,87	92,93	4,36	90,00
0,60	1	2,60	2,40	37,50	0,91	97,50	4,57	90,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 32: Traço em massa CC 1:6,5 e CAA VMA 1:6,5

Teor	Traço Unitário (c:a:b)			Cimento (kg)		Areia (kg)		Brita (kg)
				Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	Massa Total
0,50	1	2,75	3,75	24,00	-	66,00	-	90,00
0,51	1	2,83	3,68	24,49	0,49	69,18	3,18	90,00
0,52	1	2,90	3,60	25,00	0,51	72,50	3,32	90,00
0,53	1	2,98	3,53	25,53	0,53	75,96	3,46	90,00
0,54	1	3,05	3,45	26,09	0,56	79,57	3,61	90,00
0,55	1	3,13	3,38	26,67	0,58	83,33	3,77	90,00
0,56	1	3,20	3,30	27,27	0,61	87,27	3,94	90,00
0,57	1	3,28	3,23	27,91	0,63	91,40	4,12	90,00
0,58	1	3,35	3,15	28,57	0,66	95,71	4,32	90,00
0,59	1	3,43	3,08	29,27	0,70	100,24	4,53	90,00
0,60	1	3,50	3,00	30,00	0,73	105,00	4,76	90,00

(fonte: elaborado pelo autor)

As tabelas de dosagem completas com os traços secos em massa, 1:3,5; 1:5 e 1:6,5 do CAA NP são apresentados respectivamente nas Tabela 33, Tabela 34, Tabela 35, o traço utilizado está destacado.

Tabela 33: Traço em massa CAA NP 1:3,5

Traço Unitário (c:a:b:f)				Cimento (kg)		Areia (kg)	Brita (kg)		Finos (kg)	
c	a	b	f	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
1	1,61	1,89	0	49,69	-	80,00	93,91	-	0,00	-
1	1,51	1,89	0,10	52,98	3,29	80,00	100,13	6,22	5,30	5,30
1	1,41	1,89	0,20	56,74	3,76	80,00	107,23	7,10	11,35	6,05
1	1,31	1,89	0,30	61,07	4,33	80,00	115,42	8,19	18,32	6,97
1	1,21	1,89	0,40	66,12	5,05	80,00	124,96	9,54	26,45	8,13
1	1,11	1,89	0,50	72,07	5,96	80,00	136,22	11,26	36,04	9,59

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 34: Traço em massa CAA NP 1:5

Traço Unitário (c:a:b:f)				Cimento (kg)		Areia (kg)	Brita (kg)		Finos (kg)	
c	a	b	f	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
1	2,48	2,52	0	32,26	-	80,00	81,29	-	0,00	-
1	2,38	2,52	0,10	33,61	1,36	80,00	84,71	3,42	3,36	3,36
1	2,28	2,52	0,20	35,09	1,47	80,00	88,42	3,72	7,02	3,66
1	2,18	2,52	0,30	36,70	1,61	80,00	92,48	4,06	11,01	3,99
1	2,08	2,52	0,40	38,46	1,76	80,00	96,92	4,45	15,38	4,38
1	1,98	2,52	0,50	40,40	1,94	80,00	101,82	4,90	20,20	4,82

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 35: Traço em massa CAA NP 1:6,5

Traço Unitário (c:a:b:f)				Cimento (kg)		Areia (kg)	Brita (kg)		Finos (kg)	
c	a	b	f	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo
1	3,35	3,15	0	23,88	-	80,00	75,22		0,00	
1	3,25	3,15	0,10	24,62	0,73	80,00	77,54	2,31	2,46	2,46
1	3,15	3,15	0,20	25,40	0,78	80,00	80,00	2,46	5,08	2,62
1	3,05	3,15	0,30	26,23	0,83	80,00	82,62	2,62	7,87	2,79
1	2,95	3,15	0,40	27,12	0,89	80,00	85,42	2,80	10,85	2,98
1	2,85	3,15	0,50	28,07	0,95	80,00	88,42	3,00	14,04	3,19

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Tabela 36 é apresentado o consumo real dos materiais (kg/m³) dos concretos produzidos.

Tabela 36: Consumo real dos materiais (kg/m³) dos concretos produzidos

Concretos	Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	SP	VMA	Areia Fina
CC	1:3,5	487,0	784,1	920,5	0,45	-	-	-
	1:5	366,6	909,2	923,9	0,59	-	-	-
	1:6,5	288,2	965,5	907,9	0,76	-	-	-
CAA VMA	1:3,5	488,9	787,2	924,1	0,45	2,0	1,5	-
	1:5	367,9	912,5	927,2	0,59	1,5	1,1	-
	1:6,5	292,9	981,3	922,8	0,76	2,3	0,6	-
CAA NP	1:3,5	499,3	654,1	943,7	0,45	2,0	-	149,8
	1:5	367,9	838,9	927,2	0,59	2,2	-	73,6
	1:6,5	290,5	857,0	915,2	0,76	2,3	-	116,2

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.2 Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão para a etapa de dosagem são apresentados no APÊNDICE A. Na Figura 27 são apresentadas as curvas representativas da evolução da resistência potencial à compressão de todos os concretos produzidos. Observa-se que para os traços 1:3,5 a resistência à compressão é, em todas as idades, maior para o CAA NP e mais baixa para o CC; enquanto para os traços 1:5 e 1:6,5, há uma alternância de posições durante todo o período, com valores muito próximos para a idade de 63 dias, principalmente para o traço mais pobre.

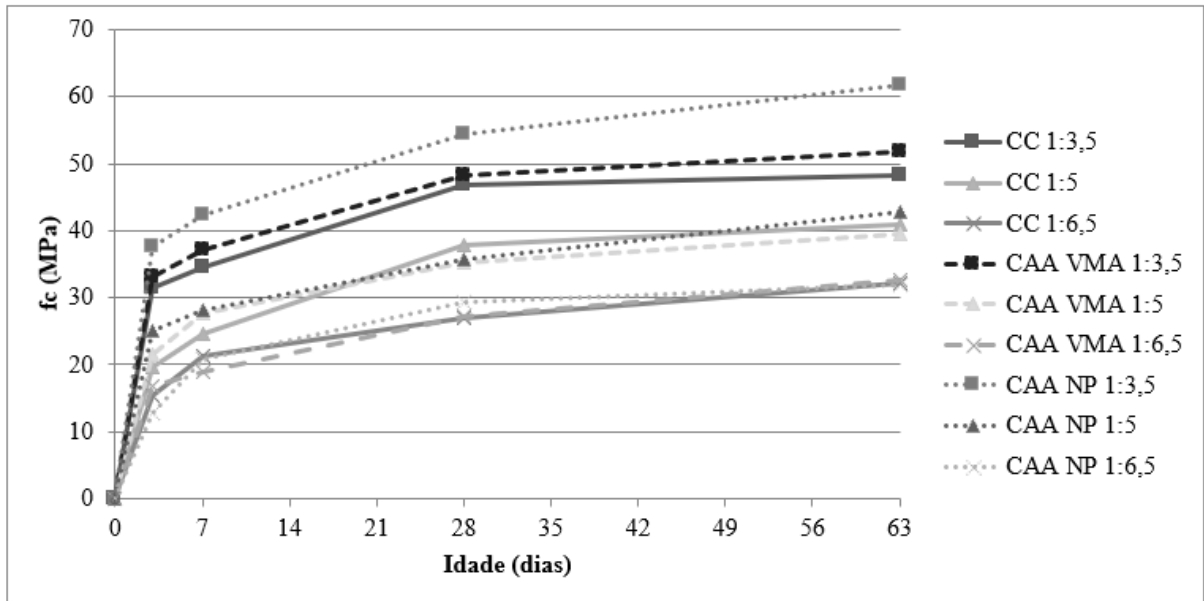


Figura 27: Resistência potencial à compressão na etapa de dosagem

(fonte: elaborado pelo autor)

Já nos gráficos apresentados nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30, são apresentadas compilações organizadas por famílias. Torna-se ainda mais explícito o maior ganho de resistência respectivamente para os traços 1:3,5; 1:5 e 1:6,5, para todas as famílias analisadas.

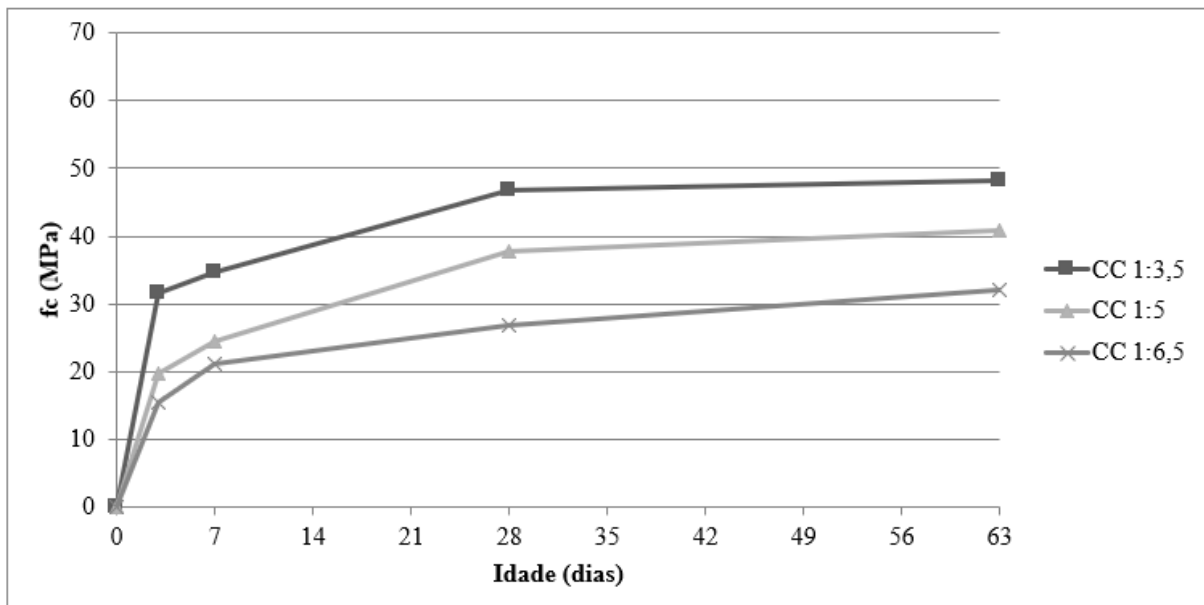


Figura 28: Resistência potencial à compressão dos CC na etapa de dosagem

(fonte: elaborado pelo autor)

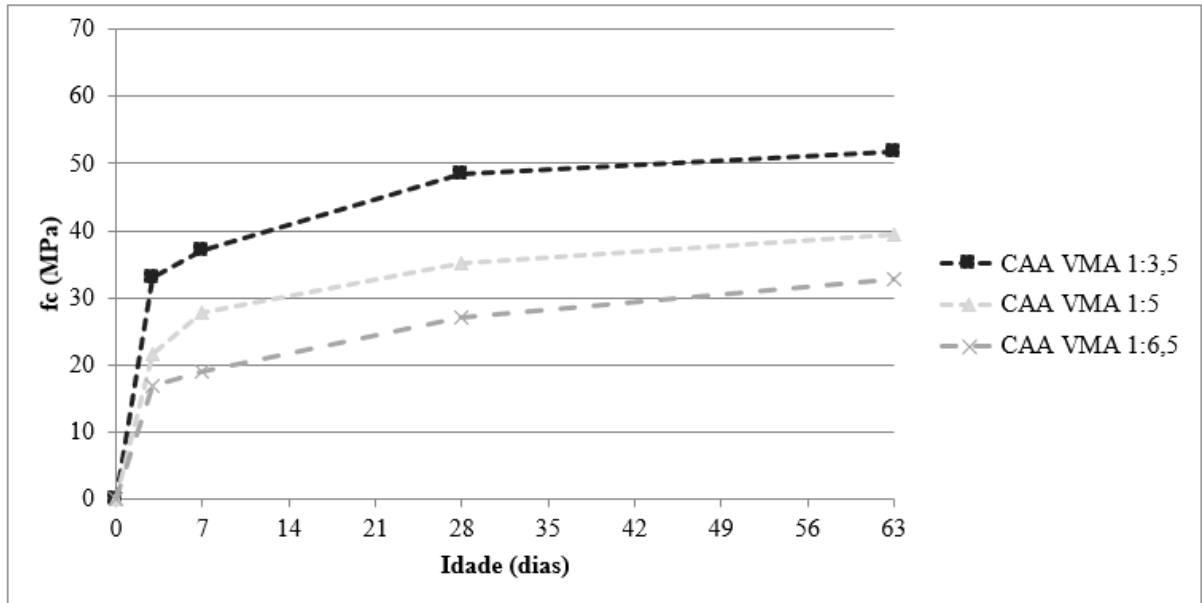


Figura 29: Resistência potencial à compressão dos CAA VMA na etapa de dosagem

(fonte: elaborado pelo autor)

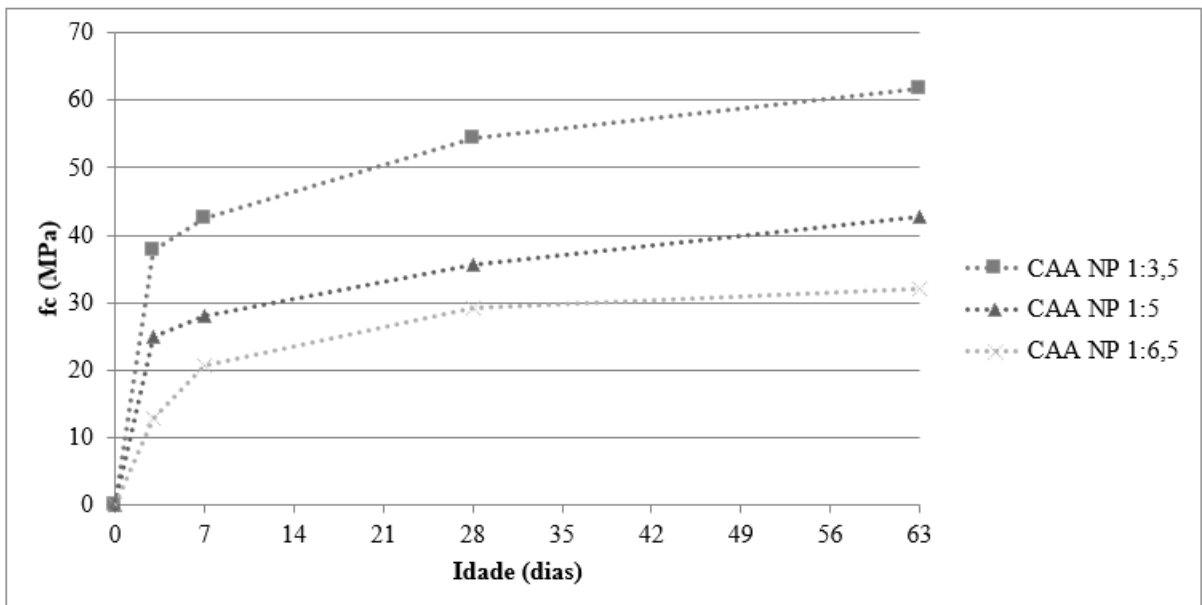


Figura 30: Resistência potencial à compressão dos CAA NP na etapa de dosagem

(fonte: elaborado pelo autor)

5.1.3 Curvas de dosagem

Os diagramas de dosagem dos concretos produzidos são mostrados nas Figura 31, Figura 32, Figura 33, para o CC, CAA VMA e CAA NP, respectivamente. Os quadrantes que compõem os diagramas são compostos por curvas que se baseiam na Lei de Abrams, que relaciona a

relação água/cimento com a resistência à compressão; Lei de Lyse, que toma a consistência do concreto como função da água/materiais secos (massa seca), independente da proporção entre agregados; e Lei de Molinari, que relaciona o consumo de aglomerante (cimento) de um determinado concreto com o traço seco.

Os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados à compressão aos 3, 7, 28 e 63 dias, não sendo realizado ensaio aos 91 dias, devido aos prazos da pesquisa.

O consumo real dos materiais utilizado como base para as curvas está na Tabela 36, enquanto os valores potenciais de resistência à compressão podem ser encontrados no APÊNDICE A, naturalmente, em ambas as tabelas, pode-se encontrar o traço “m”.

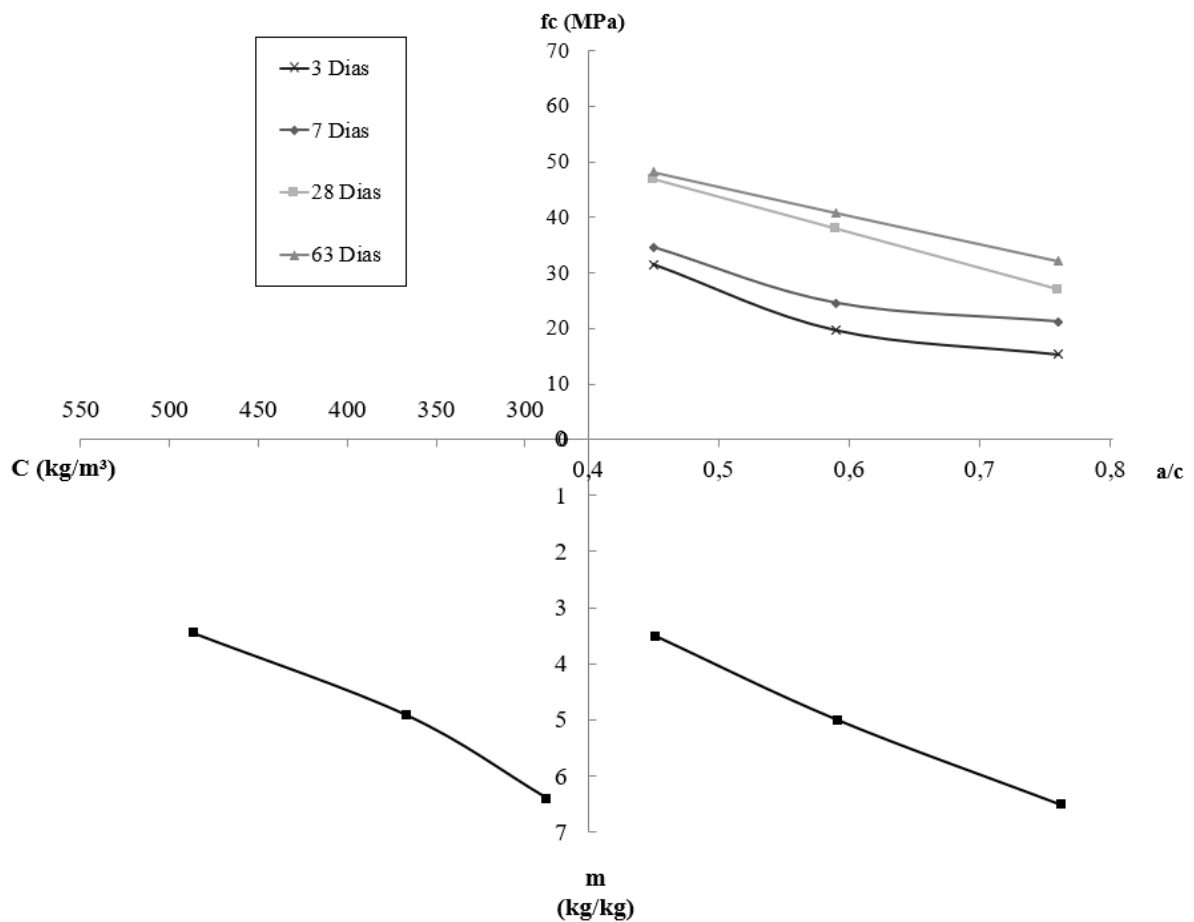


Figura 31: Curva de dosagem para o CC

(fonte: elaborado pelo autor)

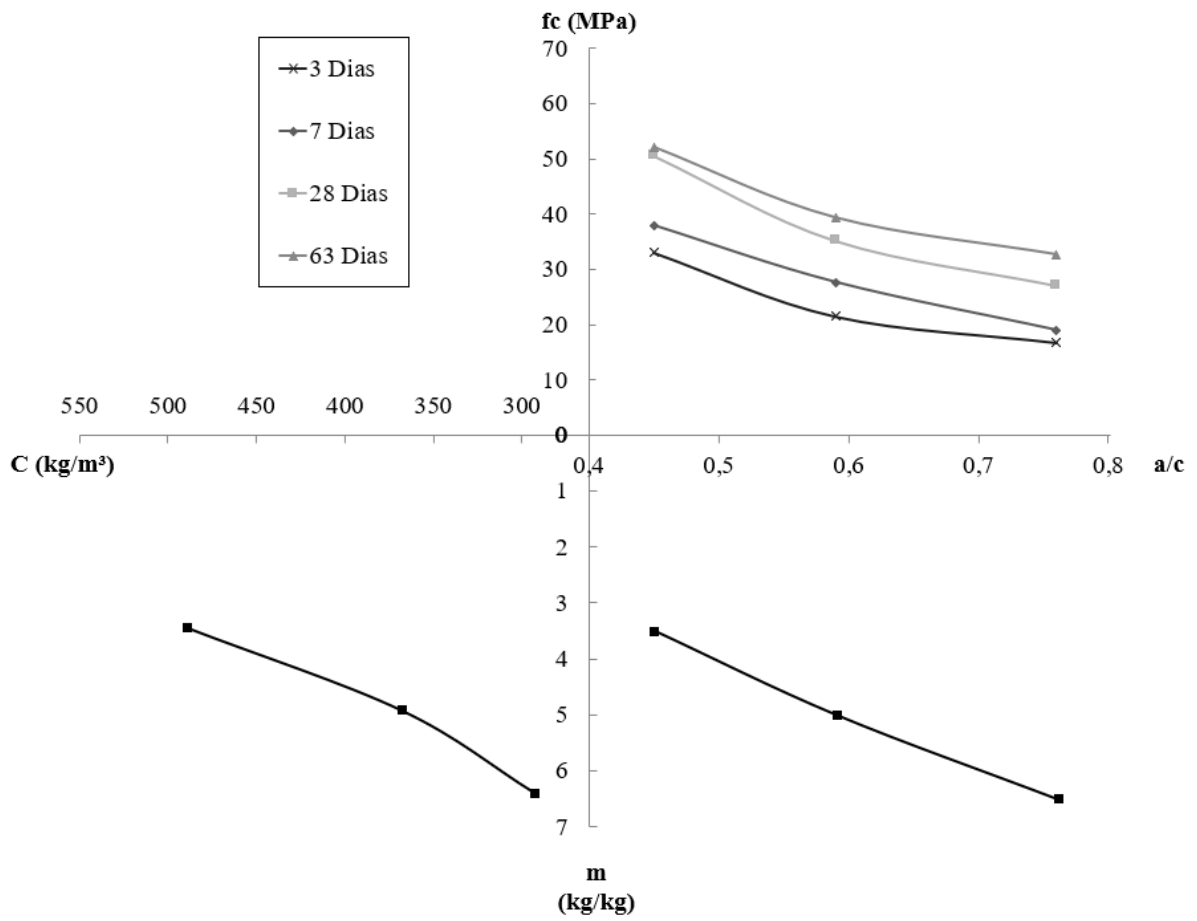


Figura 32: Curva de dosagem para o CAA VMA

(fonte: elaborado pelo autor)

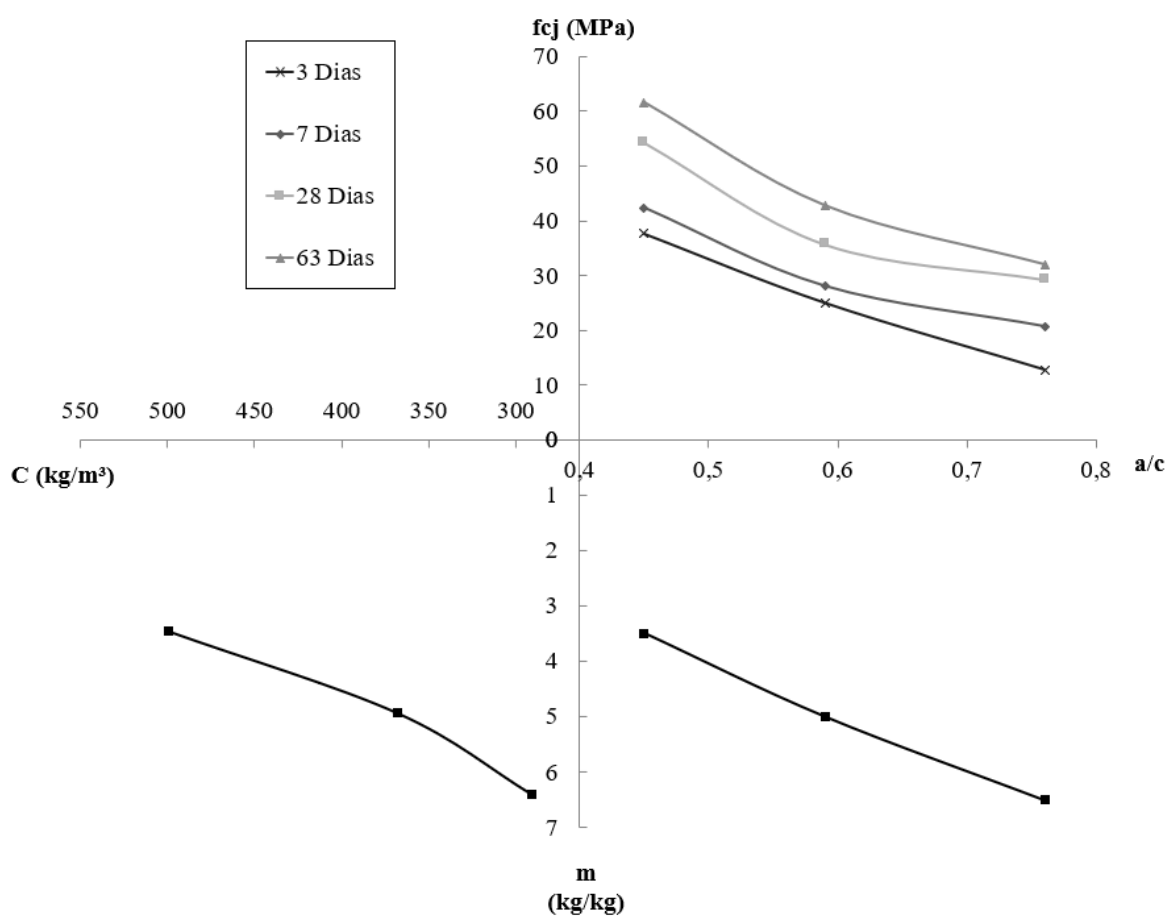


Figura 33: Curva de dosagem para o CAA NP

(fonte: elaborado pelo autor)

Os diagramas de dosagem representam os modelos de comportamento. Estabeleceram-se as equações e os coeficientes de determinação das curvas de dosagem, apresentados na Tabela 37.

Tabela 37: Equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem

Concretos	CC	CAA VMA	CAA NP
Lei de Abrams	$f_{c3} = \frac{83,84}{9,91^{a/c}}$	$f_{c3} = \frac{83,93}{8,73^{a/c}}$	$f_{c3} = \frac{185,90}{32,69^{a/c}}$
	$R^2=0,95$	$R^2=0,96$	$R^2=0,99$
	$f_{c7} = \frac{66,78}{4,75^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{103,75}{9,35^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{115,05}{9,88^{a/c}}$
	$R^2=0,93$	$R^2=1,00$	$R^2=0,98$
	$f_{c28} = \frac{106,28}{6,00^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{120,30}{7,33^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{124,77}{7,11^{a/c}}$
	$R^2=0,99$	$R^2 = 0,98$	$R^2 = 0,94$
	$f_{c63} = \frac{87,16}{3,69^{a/c}}$	$f_{c63} = \frac{99,59}{4,45^{a/c}}$	$f_{c63} = \frac{154,54}{8,16^{a/c}}$
	$R^2=1,00$	$R^2=0,97$	$R^2=0,99$
Lei de Lyse	$m = 9,65 * a/c - 0,79$	$m = 9,65 * a/c - 0,79$	$m = 9,65 * a/c - 0,79$
	$R^2=1,00$	$R^2=1,00$	$R^2=1,00$
Lei de Molinari	$C = \frac{2117,7}{m + 0,8247}$	$C = \frac{2247,7}{m + 1,025}$	$C = \frac{2084,2}{m + 0,6709}$
	$R^2=1,00$	$R^2=1,00$	$R^2=1,00$

(fonte: elaborado pelo autor)

5.2 Estado fresco

5.2.1 Ensaios de caracterização no estado fresco

Os resultados dos ensaios realizados no estado fresco são apresentados na Tabela 38, a descrição dos ensaios está no item 3.4. Não foram realizados outros testes para a determinação das propriedades passantes do CAA.

Tabela 38: Classificação no estado fresco

Concretos	Traço	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)	Tempo de Escoamento (s)	Índice de Estabilidade Visual - IEV
Referência	1:3,5	80	-	-	-
	1:5	120	-	-	-
	1:6,5	80	-	-	-
CAA VMA	1:3,5	-	750	0,9	0 (Altamente Estável)
	1:5	-	750	0,9	0 (Altamente Estável)
	1:6,5	-	760	0,9	1 (Estável)
CAA NP	1:3,5	-	680	0,45	0 (Altamente Estável)
	1:5	-	680	0,9	0 (Altamente Estável)
	1:6,5	-	720	0,7	1 (Estável)

(fonte: elaborado pelo autor)

O espalhamento entre 660 e 750 mm, ver Figura 34, por sua vez, foi buscado como classificação intermediária; a qual, por sua vez, é adequada para a maioria das aplicações correntes de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), tendo sua classe de espalhamento “SF2”.

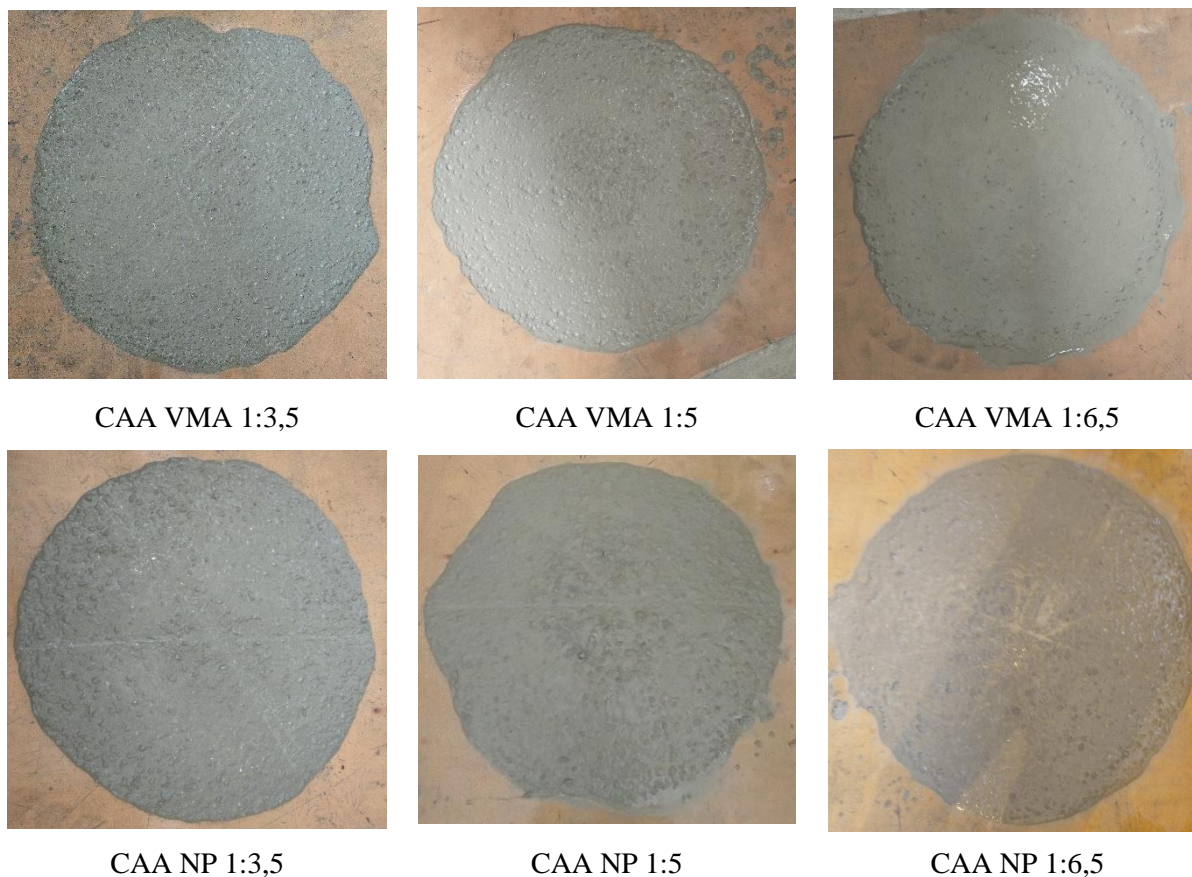


Figura 34: Imagens do *Slump Flow Test* dos CAA

(fonte: elaborado pelo autor)

O tempo de escoamento, embora bastante variável, já que depende dos reflexos do operador do cronômetro (variação principalmente em relação ao momento de início da medição) pode ser classificado como maior ou menor do que dois segundos, classificação que permite homogeneizar os resultados da pesquisa em uma única classificação, de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2017a), que é classe de viscosidade plástica aparente “VS1”, apropriada para elementos que apresentam alta densidade de armadura. A viscosidade plástica aparente também é uma característica importante quando se deseja bons acabamentos superficiais.

O índice de estabilidade visual, por sua vez, tem quatro níveis de classificação, sendo o “IEV0” aquele em que não há evidência de segregação ou exsudação, enquanto o “IEV1” apresenta leve exsudação, mas ainda sem presença de segregação (ABNT, 2017). Para descrição de todos os índices, ver Tabela 20.

5.2.2 Massa específica no estado fresco

Os resultados médios dos ensaios de massa específica no estado fresco para a etapa de dosagem são apresentados na Figura 35. Os valores coletados que serviram de base para os resultados apresentados encontram-se no APÊNDICE B. Avaliando-se a massa específica em função das famílias, insinua-se de maneira discreta uma menor densidade do traço 1:6,5. Entretanto, o traço 1:5 apresentou-se mais denso tanto para o CC quanto para o CAA VMA.

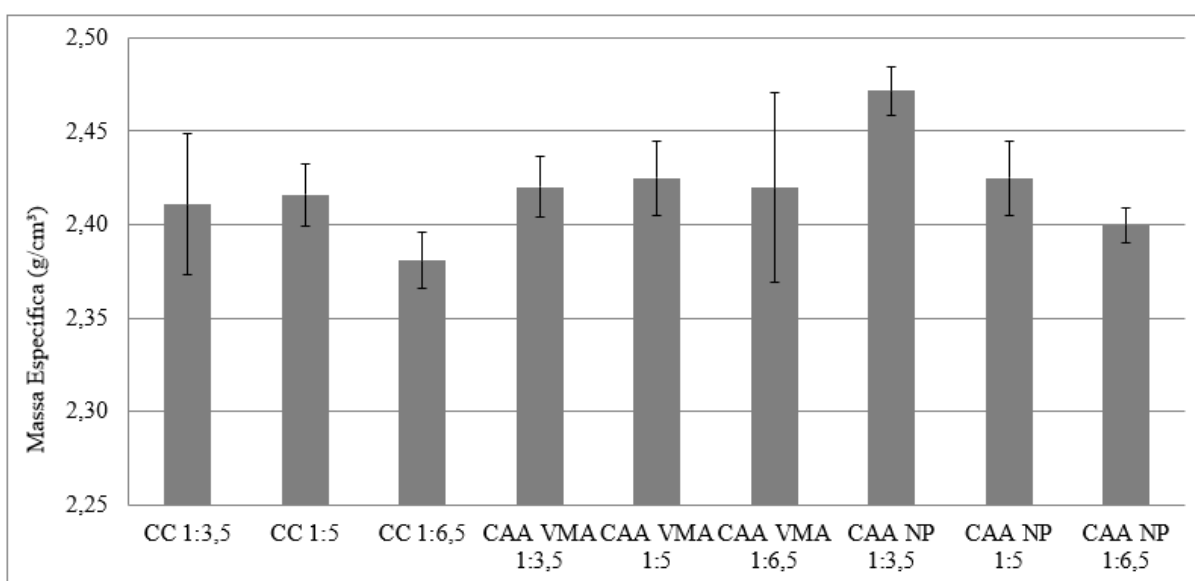


Figura 35: Massa específica média do concreto no estado fresco

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando-se os gráficos por traço, percebe-se maior densidade no estado fresco para o CAA NP, seguido pelo CAA VMA e por último o CC, com exceção para o traço 1:6,5, o qual apresenta um comportamento diferente.

5.3 Estado endurecido

5.3.1 Massa específica no estado endurecido

Durante o período de cura e sazonalização realizou-se o registro das massas dos corpos de prova. A evolução das massas específicas em função do tempo para os corpos de prova transferidos para câmara seca após período de 7 dias em câmara úmida é apresentada na Figura 36, com base em dados apresentados no APÊNDICE C, APÊNDICE D e APÊNDICE E. Observou-se que os traços 1:6,5 perderem massa ainda dentro da câmara úmida, enquanto os traços 1:3,5 apresentaram menor variação nos primeiros 7 dias.

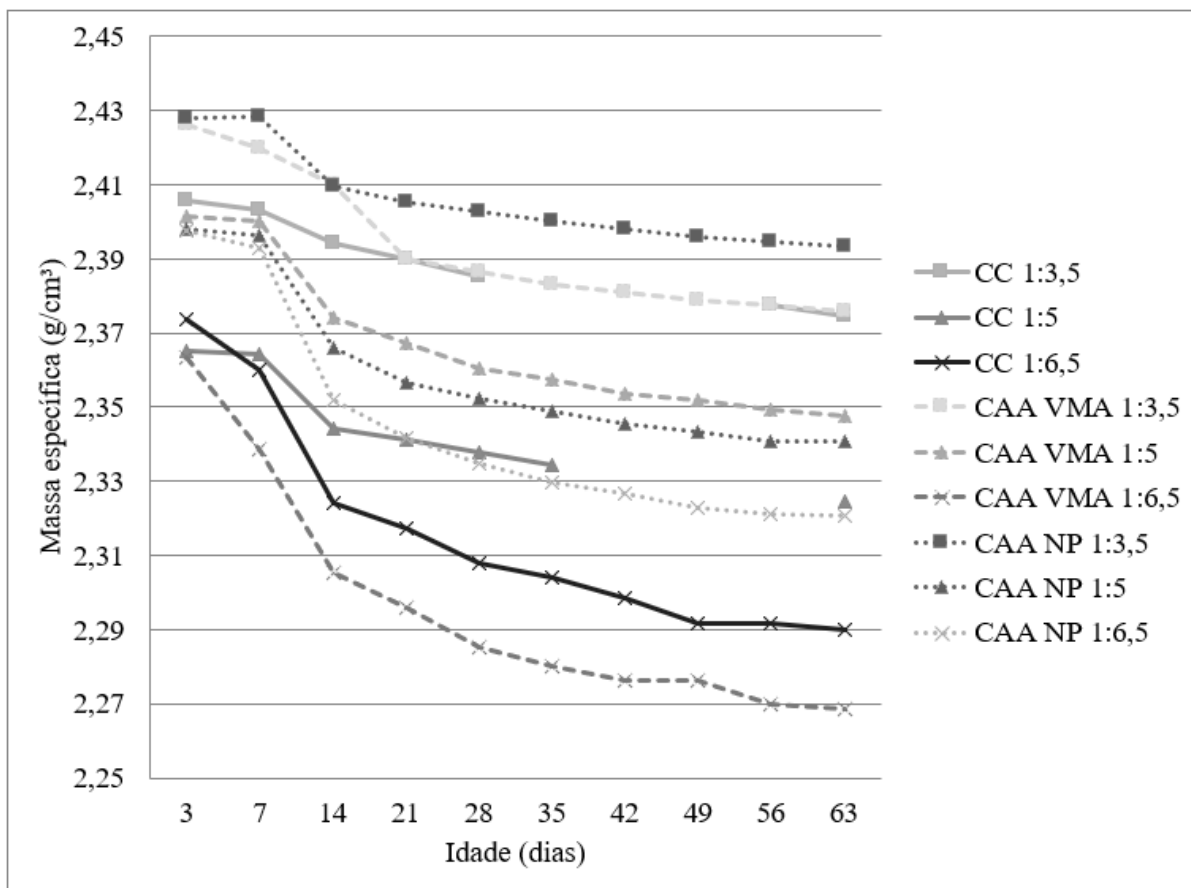


Figura 36: Massa específica dos concretos sazoados em função da idade

(fonte: elaborado pelo autor)

Um comportamento semelhante evidencia-se em função da aceleração da perda de massa para o traço 1:6,5 após transferência para câmara seca, seguindo o mesmo padrão de variação dos 7 aos 14 dias, com maior variação de massa para os traços 1:6,5, 1:5 e 1:3,5, respectivamente. Tal padrão talvez não esteja tão evidente na Figura 36, mas pode ser mais bem observado na Figura 37.

A fim de organizar os traços em função das maiores variações de densidade, optou-se por normalizar as densidades, cujos dados são apresentados na Figura 37. Desta forma evidencia-se ainda mais a maior variação de massa e semelhança entre os traços 1:6,5. É possível observar, também, a menor variação de massa para os traços 1:3,5, embora o CC 1:5 apareça entre eles.

As menores densidades dos traços pobres estão relacionadas ao maior índice de vazios. O volume de vazios na pasta decresce com a diminuição da relação água/cimento e com o

avanço da idade de hidratação. Isso ocorre pois o espaço ocupado inicialmente pela água e partículas de cimento em dissolução, quando o cimento é disperso em água, vai sendo ocupado pelos produtos de hidratação. O espaço que não é ocupado pelos produtos de hidratação ou pelo cimento anidro permanece como vazios capilares, o tamanho e o volume desses capilares é influenciado pelo afastamento inicial entre as partículas do cimento anidro na pasta de cimento fresca, diretamente relacionada à relação água/cimento e pelo grau de hidratação do cimento.

Dado que os agregados são geralmente densos e resistentes, atribui-se à porosidade da matriz e à porosidade da zona de transição entre matriz e agregado gráudo as características de resistência dos concretos. Porosidades estas que têm como seu principal fator de influência a relação água/cimento. Sendo o aumento da relação água cimento diretamente associado ao aumento da porosidade e conseqüente enfraquecimento da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

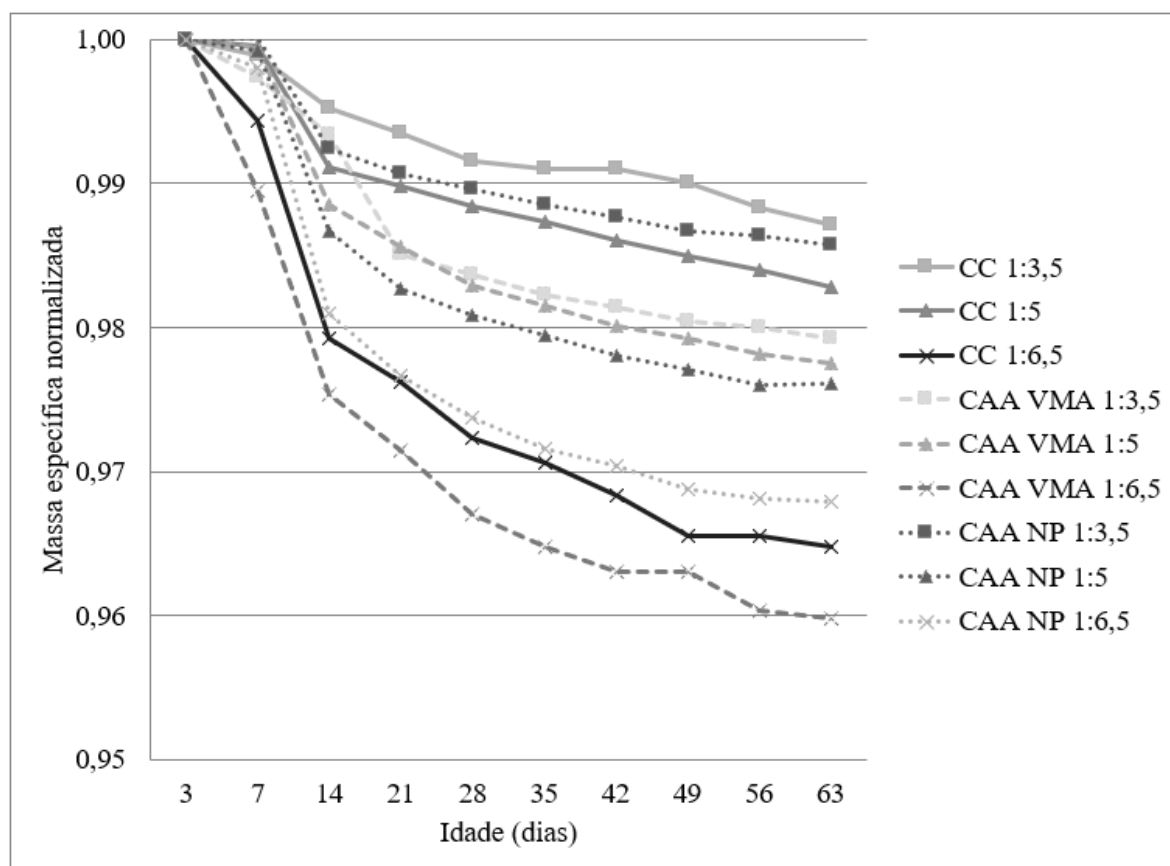


Figura 37: Massa específica normalizada dos concretos sazoados em função da idade

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados demonstram que os traços mais pobres em cimento, que também possuem as maiores relações água/cimento, são os mais porosos. Desta forma permitem a saída da água de dentro do concreto, o que implica nas maiores variações de densidade observadas. Os agregados também apresentam porosidades distintas. Nos materiais constituídos de diversas fases como o concreto, a porosidade de cada um dos componentes ou fases presentes em sua estrutura podem se tornar um fator limitador de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A massa específica do concreto no estado endurecido pode ser relacionada diretamente a sua resistência à compressão, conforme Figura 38, onde comparação entre a massa específica e a resistência à compressão aos 28 dias é apresentada.

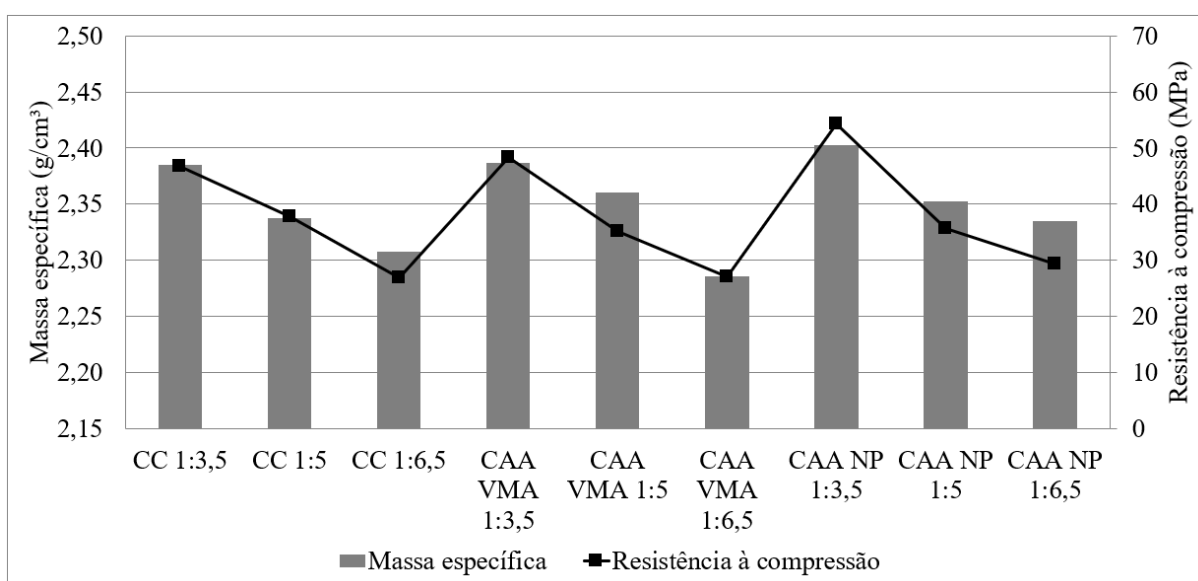


Figura 38: Relação entre massa específica e resistência à compressão aos 28 dias

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.2 Variação de massa e teor de umidade

A variação de massa dos concretos foi determinada com 3 corpos de prova de cada traço produzido, os quais foram mantidos 7 dias em câmara úmida, 21 dias em câmara seca, e posteriormente secos em estufa a 105°C por um período não inferior a 28 dias, e por tempo suficiente para que atingissem a constância de massa. Com o objetivo estimar a variação de massa, foram registradas as massas inicial e final em cada etapa.

A variação de massa foi atribuída à perda de água. Segundo Li *et al.* (2021), o teor de umidade representa a porcentagem em massa de umidade nos corpos de prova de concreto, que está intimamente relacionada com o aumento da pressão dos poros em temperatura

elevada, sendo por esse motivo, importante de ser avaliada. Os valores registrados que serviram de base para a determinação dos teores de umidade de cada concreto são apresentados no APÊNDICE F.

Na Figura 39 são apresentadas as variações médias de massa de cada concreto, após a concluída a secagem. Ressalta-se que a porcentagem total é um valor representativo do teor de umidade teórico de corpos de prova armazenados exclusivamente em câmara úmida, ou seja, estima-se que CPs em câmara úmida, os quais ainda preservam a totalidade de sua umidade, apresentem teores de umidade entre 5,68% e 7,86%.

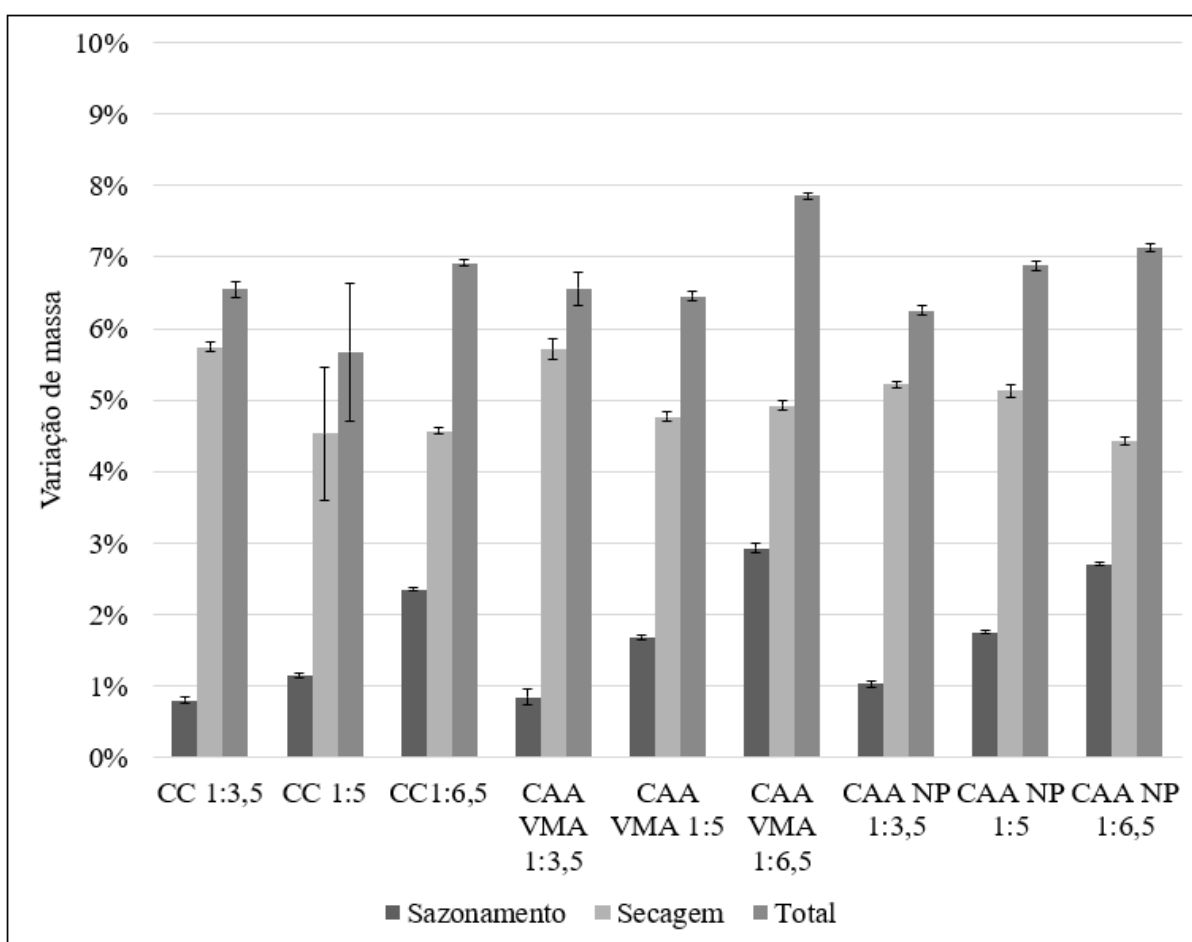


Figura 39: Variação de massa nos concretos que foram secos em estufa

(fonte: elaborado pelo autor)

Os CPs que foram submetidos ao aquecimento até as temperaturas alvo da pesquisa passaram por etapa de sazonalização, a qual durou 63 dias, a fim de reduzir seu teor de umidade e assim diminuir a probabilidade de ocorrer *spalling*. O sazonalização iniciou-se após 7 dias em

câmara úmida, quando os corpos de prova foram transferidos para câmara seca, com temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de 50%.

Para a determinação da variação do teor de umidade na etapa de sazonalidade foi acompanhada a variação de massa em todos os 36 corpos de prova de cada um dos 9 traços. As massas iniciais, massas pré-aquecimento e massas pós-aquecimentos, bem como os valores as variações em porcentagem são apresentadas no APÊNDICE G.

Na Figura 40 é apresentada a variação de massa dos corpos de prova durante o período de sazonalidade, a variação de massa total que foi determinada com os CPs mantidos em estufa e já apresentada na Figura 39, e o teor de umidade dos CPs no momento em que inicia-se o aquecimento até as temperaturas alvo. O teor de umidade foi considerado como a diferença entre o teor de umidade máximo do concreto, aquele determinado pelo método da secagem, e o teor de umidade no qual ele se encontra após o sazonalidade de 63 dias. A diferença calculada foi interpretada como a água que ainda não havia deixado o concreto, ou seja, seu teor de umidade pré-aquecimento.

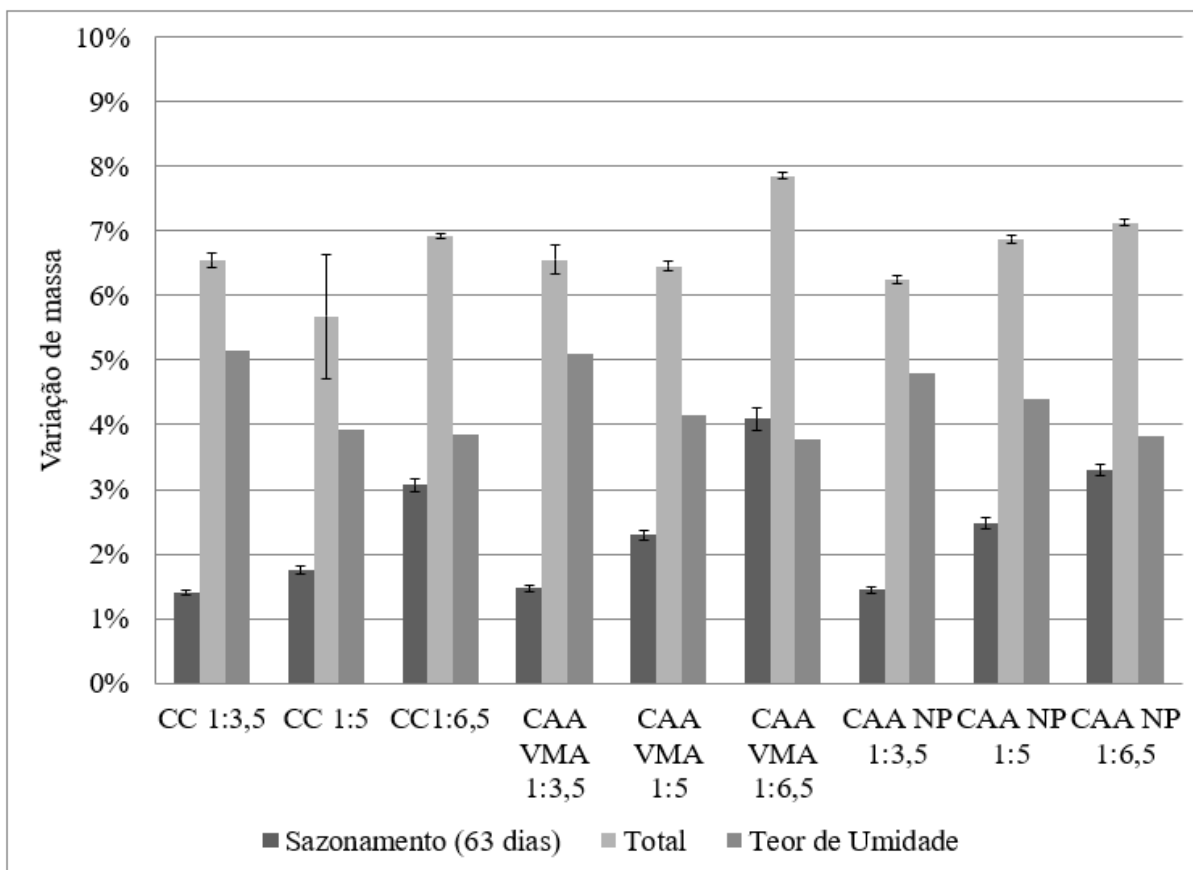


Figura 40: Variação de massa nos concretos que foram aquecidos posteriormente

(fonte: elaborado pelo autor)

É possível observar que na etapa de sazonalamento, tanto na Figura 39 quanto na Figura 40, a maior perda de água nos traços 1:6,5, seguida pelos traços 1:5 e 1:3,5, respectivamente. Esse fenômeno pode ser atribuído à maior porosidade do concreto 1:6,5, o que facilitaria a saída da água.

Desta forma é possível saber quais os teores de umidade do concreto durante o aquecimento, sendo que os da pesquisa ficaram entre 3,77% e 5,15%. Para valores mais detalhados em relação aos teores de umidade pré-aquecimento, ver Tabela 39. Kirchhof *et al.* (2020) informam que o teor de umidade recomendado para que não ocorra *spalling* em concretos comuns é igual ou menor do que 3% da massa, embora essa simplificação possa excluir outros fatores importantes da análise, entre eles o tipo de agregado, permeabilidade, porosidade e a quantidade de cimento na mistura.

Tabela 39: Teor de umidade - pré-aquecimento

Traço	Δ Secagem (%)	Δ Sazonamento (%)	Teor de Umidade (%)
CC 1:3,5	6,55%	1,39%	5,15%
CC 1:5	5,68%	1,75%	3,93%
CC1:6,5	6,92%	3,07%	3,85%
CAA VMA 1:3,5	6,56%	1,47%	5,09%
CAA VMA 1:5	6,45%	2,29%	4,16%
CAA VMA 1:6,5	7,86%	4,09%	3,77%
CAA NP 1:3,5	6,25%	1,45%	4,81%
CAA NP 1:5	6,88%	2,47%	4,41%
CAA NP 1:6,5	7,13%	3,30%	3,84%

(fonte: elaborado pelo autor)

Autores como Connolly (1995) afirmam, embora para concretos convencionais, que corpos de prova submetidos a secagem em fornos a 105°C antes de serem aquecidos, não sofreram *spalling*. Yermak *et al.* (2017), por sua vez, ensaiaram concretos de alta resistência com teores de umidade entre 2,1% e 5,2%, curva de aquecimento ISO 834, atingindo temperaturas de até 900°C, sem observar *spalling*. Embora tenham observado *spalling* para concretos com agregados sílico-calcáreos e *spalling* explosivo quando adicionada sílica ativa.

Na Figura 41 é possível acompanhar a variação da massa dos traços aquecidos por meio dos valores de massa residual. Esse gráfico permite uma melhor visualização da evolução do processo. Por meio das inclinações das curvas é possível perceber uma taxa de variação mais intensa até os 200°C, seguida uma taxa praticamente constante entre os 200°C e 800°C, quando parece haver uma estabilização da variação de massa.

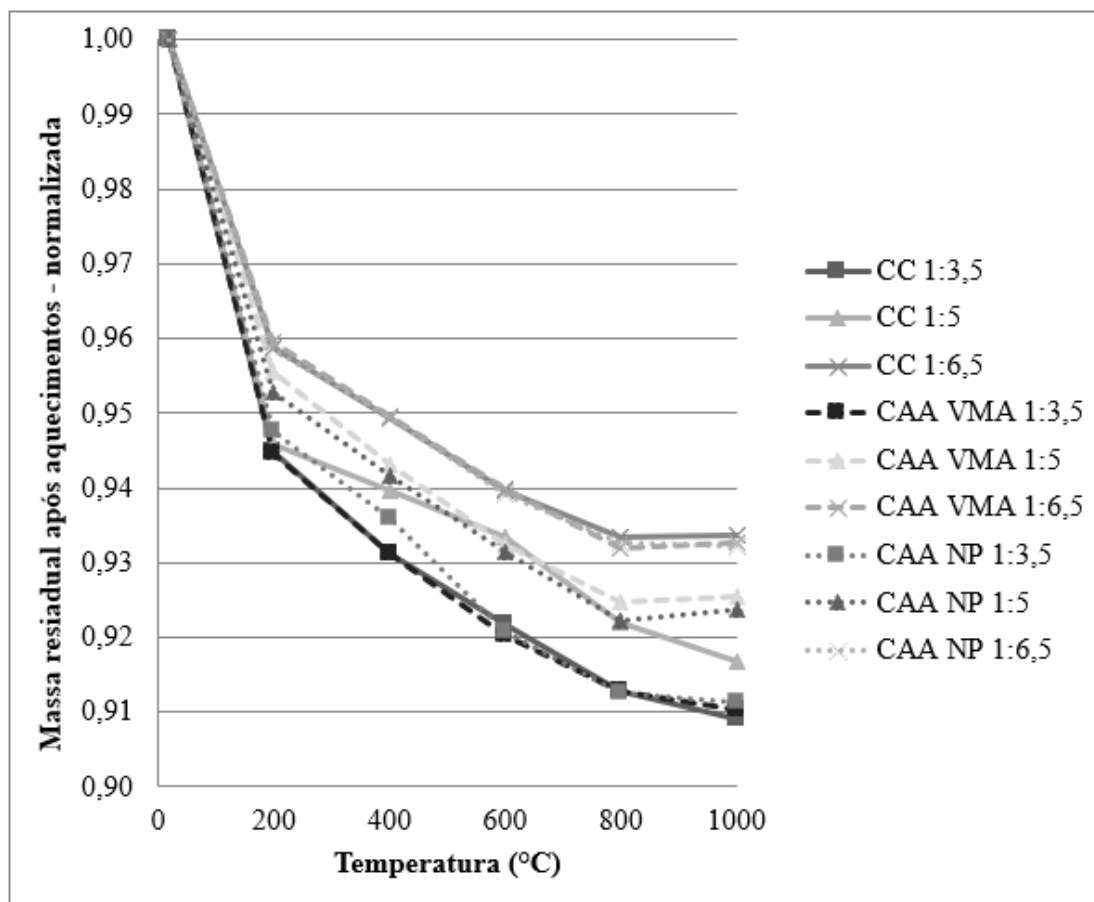


Figura 41: Massa residual após aquecimentos – normalizada

(fonte: elaborado pelo autor)

Wang *et al.* (2014) registraram o fenômeno para pastas de cimento, inicialmente uma rápida perda de massa, seguida uma suavização da curva após os 400°, o qual associou ao seu tempo de exposição de duas horas e sua insuficiência para desidratar completamente o C-S-H gel.

É possível observar na Figura 41 que os traços 1:6,5 entre os do mesmo concreto foram os que mais perderam massa tanto na secagem, quanto no sazonalamento, o que permite estimar um menor teor de umidade no início dos aquecimentos, seguido pelos traços 1:5 e 1:3,5, respectivamente. Na Figura 42, a fim de facilitar a comparação das variações de massa, é possível observar que os valores adotados como teores de umidade são ligeiramente superados nas temperaturas de 200°C, o que indica a perda de toda a água livre neste patamar de temperatura. A água capilar é aquela livre da influência das forças de atração exercidas pela superfície sólida, podendo ser subdividida em: água livre, aquela presente em vazios de diâmetros maiores que 50 nm, uma vez que a sua remoção não causa qualquer variação de

volume, e água retida por tensão capilar em capilares pequenos (5 a 50 nm), cuja remoção pode causar a retração do sistema.

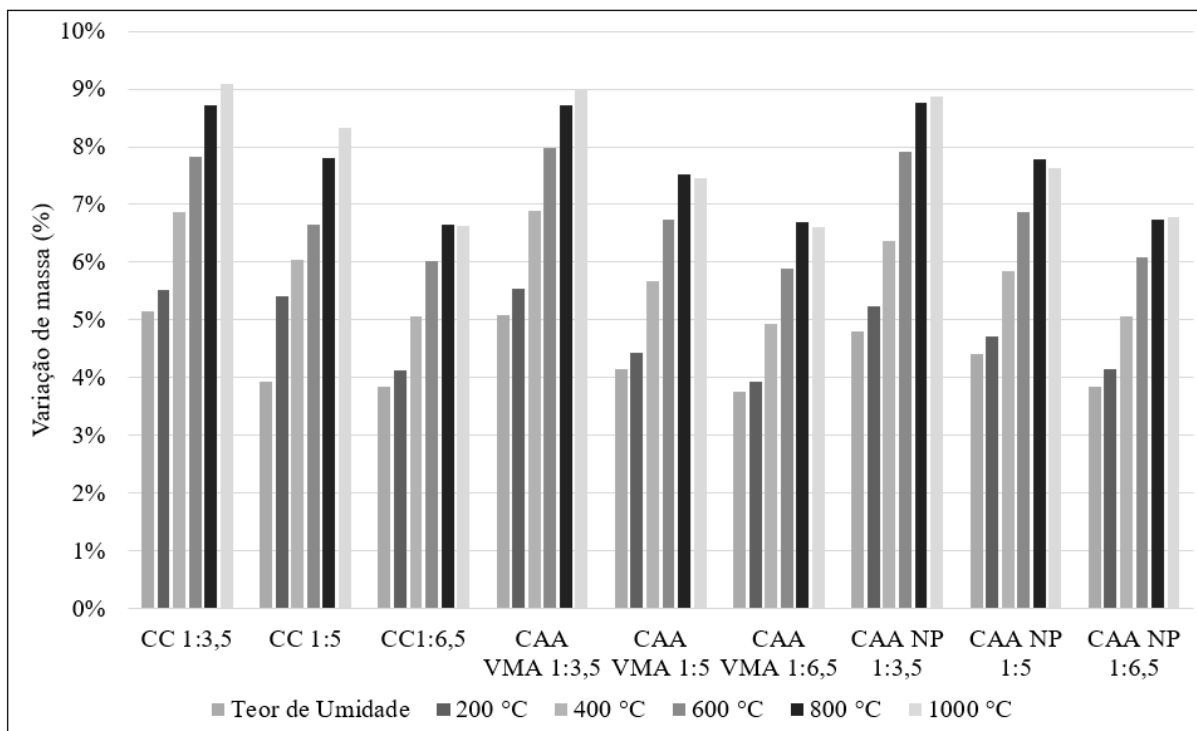


Figura 42: Comparação entre variação de massa: aquecimentos x teor de umidade

(fonte: elaborado pelo autor)

Os aquecimentos em temperaturas maiores do que a temperatura de 105 °C, que é aquela utilizada para secagem, apresentaram variações de massa maiores do que o considerado como teor de umidade.

5.3.3 Velocidades de Pulso Ultrassônico

Após a realização dos ensaios, foram determinadas as velocidades do pulso ultrassônico em cada corpo de prova, e iniciou-se um tratamento estatístico, excluindo-se os valores acima e abaixo do desvio padrão. A análise foi realizada separadamente para cada um dos concretos, primeiramente para os dados coletados nos 36 corpos de prova antes de serem aquecidos, o que gerou a média das velocidades à temperatura ambiente. Posteriormente, analisaram-se as velocidades individuais para cada traço, por patamar de aquecimento, sendo coletados dados de 6 corpos de prova por média. As médias (e seus desvios padrão) são apresentadas nas

Tabela 40 e Tabela 41, enquanto os dados utilizados para o cálculo das médias podem ser encontrados no APÊNDICE H.

Tabela 40: Médias das velocidades (m/s) em função de traço para temperaturas de 20°C a 400°C

Temperatura	20°C		200°C		400°C	
	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
CC 1:3,5	4649	16	3970	22	3210	21
CC 1:5	4384	24	3740	9	3064	23
CC 1:6,5	4280	29	3709	27	2832	28
CAA VMA 1:3,5	4587	18	3885	11	3120	21
CAA VMA 1:5	4404	19	3757	24	2990	18
CAA VMA 1:6,5	4055	19	3538	27	2838	2
CAA NP 1:3,5	4593	11	4029	13	3323	9
CAA NP 1:5	4409	14	3789	17	3065	10
CAA NP 1:6,5	4321	18	3680	25	2834	16

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 41: Médias das velocidades (m/s) em função de traço para temperaturas de 600°C a 1000°C

Temperatura	600°C		800°C		1000°C	
	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)	Média (m/s)	Desvio Padrão (m/s)
CC 1:3,5	1855	7	1442	22	1226	1
CC 1:5	1752	19	1494	18	940	26
CC 1:6,5	1399	8	858	41	830	12
CAA VMA 1:3,5	2182	18	1531	26	1391	14
CAA VMA 1:5	1648	23	1384	20	1093	23
CAA VMA 1:6,5	1505	16	1082	15	965	18
CAA NP 1:3,5	2131	7	1713	2	1328	11
CAA NP 1:5	1690	16	1271	16	1184	13
CAA NP 1:6,5	1556	17	1011	3	942	12

(fonte: elaborado pelo autor)

As variações das velocidades podem ser visualizadas na Figura 43, onde é possível perceber que a maior diminuição na velocidade do pulso ultrassônico ocorre entre as temperaturas de 400°C e 600°C, faixa considerada crítica para os efeitos deletérios das altas temperaturas sobre o concreto. Os traços mais ricos apresentam maiores velocidades, seguidos pelos intermediários e, por fim, os pobres, com pequenas variações, para todas as temperaturas de exposição.

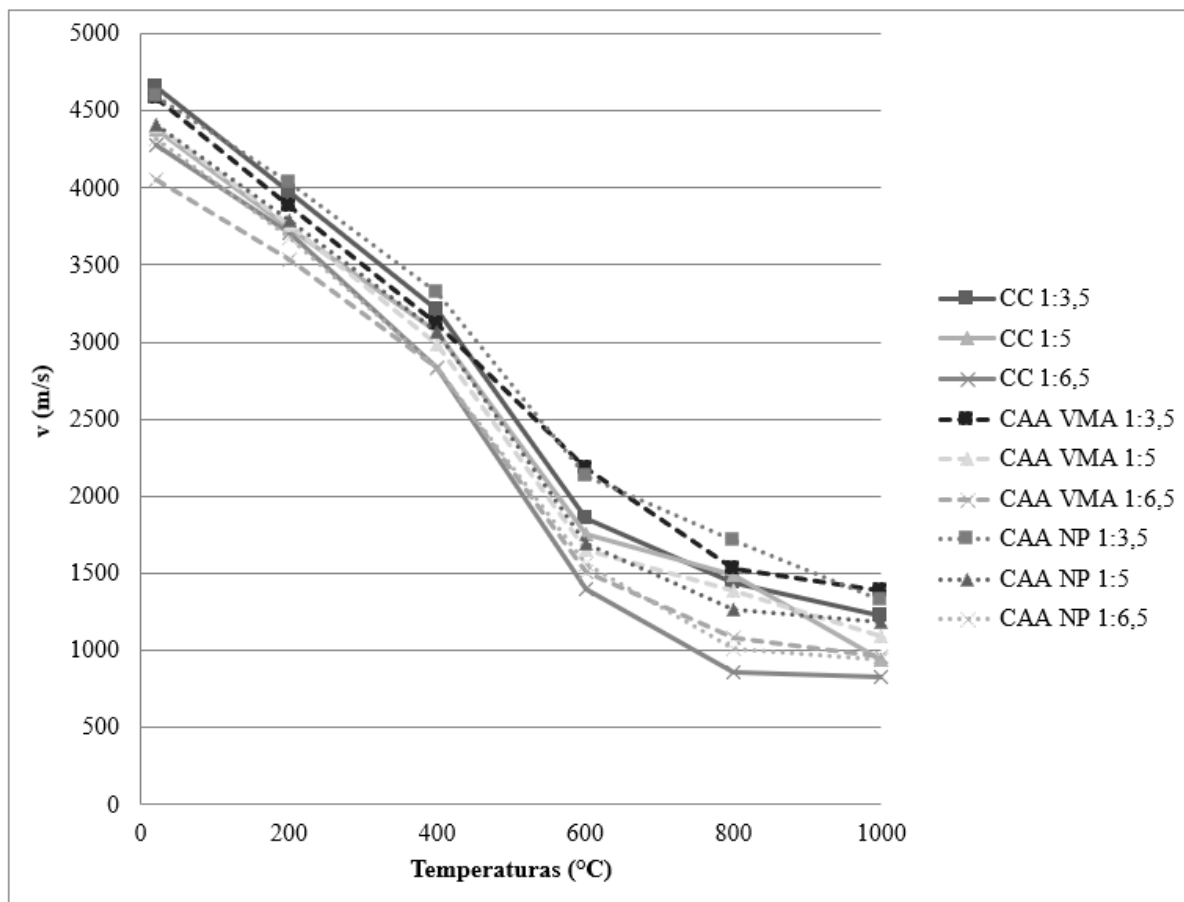


Figura 43: Gráfico da velocidade de pulso ultrassônico em função da temperatura de exposição - todos os traços

(fonte: elaborado pelo autor)

Apresentando separadamente os traços “1:m” em três gráficos, apresentados nas Figura 44, Figura 45 e Figura 46, observa-se que o comportamento é o mesmo, independente da família (CC, CAA VMA e CAA NP).

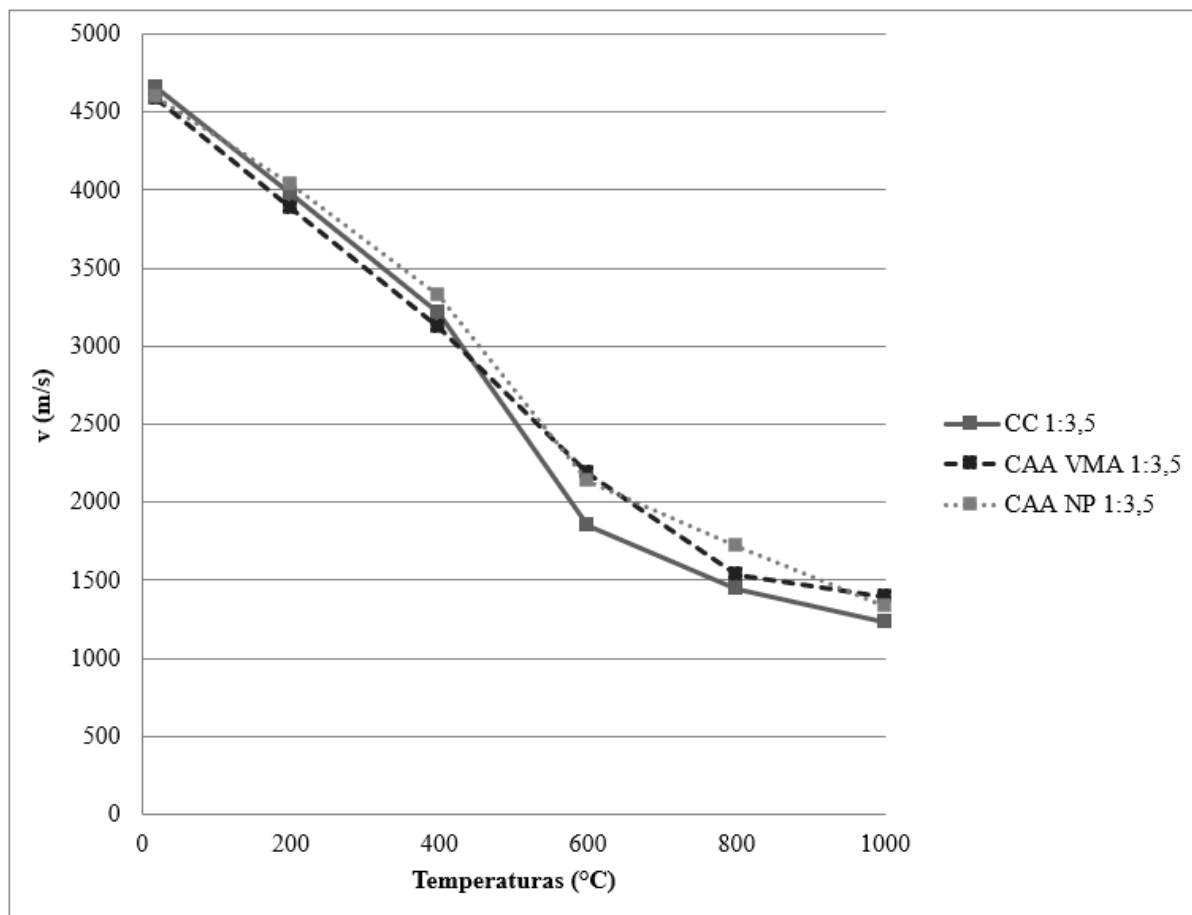


Figura 44: Gráfico da velocidade em função da temperatura de exposição – traços 1:3,5

(fonte: elaborado pelo autor)

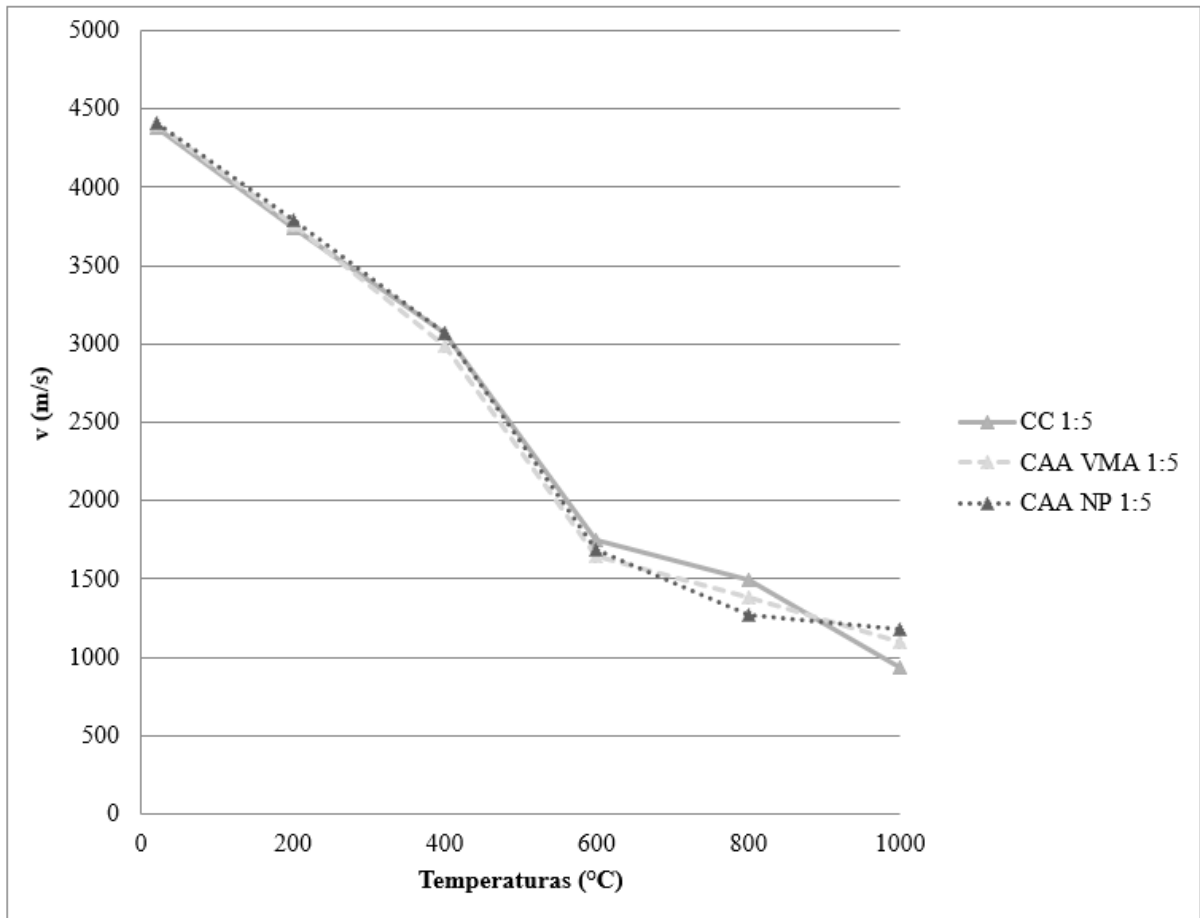


Figura 45: Gráfico da velocidade em função da temperatura de exposição - traços 1:5

(fonte: elaborado pelo autor)

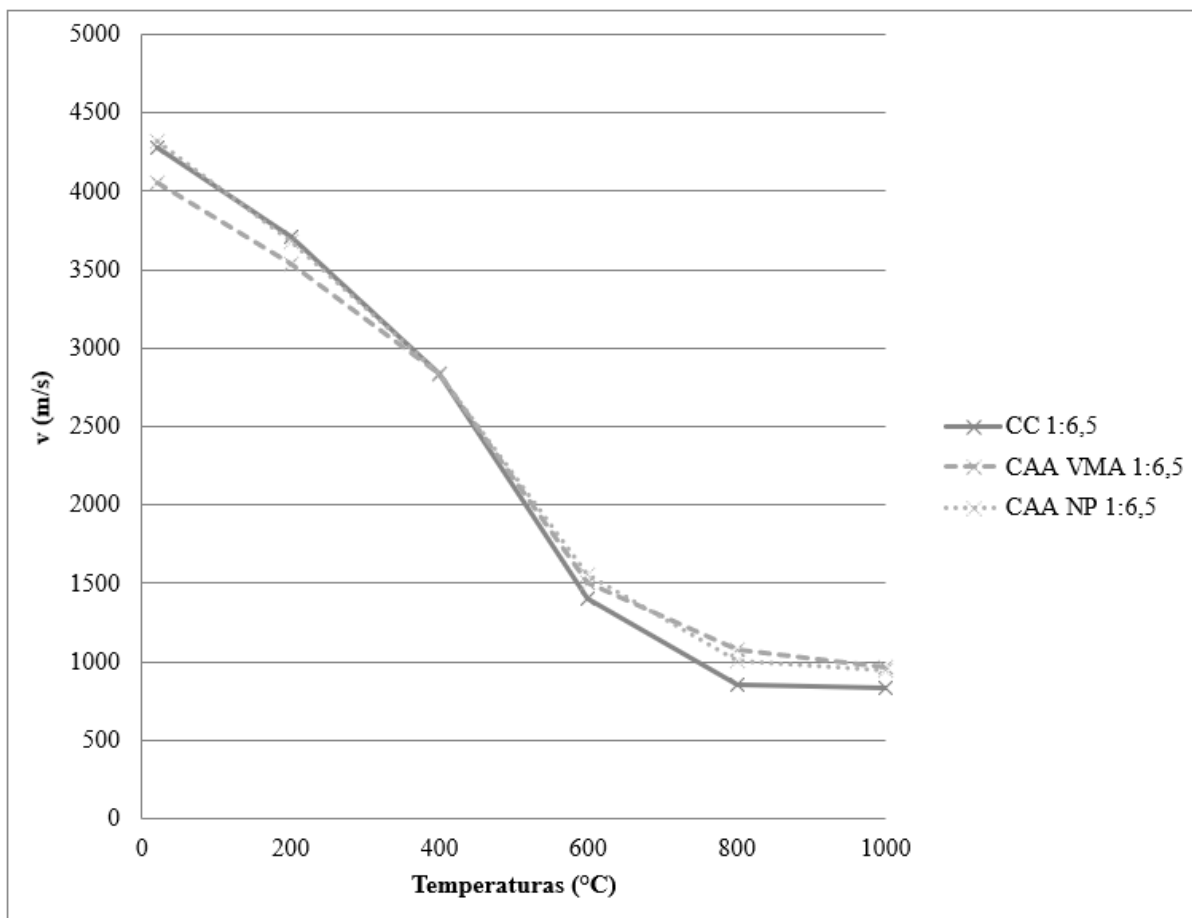


Figura 46: Gráfico da velocidade em função da temperatura de exposição - traços 1:6,5

(fonte: elaborado pelo autor)

Normalizando-se os resultados é possível fazer outras constatações. Os concretos mais pobres não apenas apresentam menores velocidades, como é esperado em função da porosidade, mas também tem sua VPU mais afetada pelas altas temperaturas, dada a baixa velocidade residual mantida. Esses resultados são apresentados na Tabela 42.

Tabela 42: Médias normalizadas para velocidades de pulso ultrassônico

Traço	20 °C	200 °C	400°C	600°C	800°C	1000°C
CC 1:3,5	1	0,86	0,69	0,40	0,31	0,26
CC 1:5	1	0,85	0,70	0,40	0,34	0,21
CC 1:6,5	1	0,87	0,66	0,33	0,20	0,19

continua

continuação

Traço	20 °C	200 °C	400°C	600°C	800°C	1000°C
CAA VMA 1:3,5	1	0,85	0,68	0,48	0,33	0,30
CAA VMA 1:5	1	0,85	0,68	0,37	0,31	0,25
CAA VMA 1:6,5	1	0,87	0,70	0,37	0,27	0,24
CAA NP 1:3,5	1	0,88	0,72	0,46	0,37	0,29
CAA NP 1:5	1	0,86	0,70	0,38	0,29	0,27
CAA NP 1:6,5	1	0,85	0,66	0,36	0,23	0,22

(fonte: elaborado pelo autor)

Outro comportamento que chama atenção na evolução da velocidade de pulso ultrassônico em função das temperaturas, é o impacto mais acelerado sobre os traços 1:6,5 em temperaturas não tão altas. Aos 600°C ele se distancia do traço 1:3,5, em alguns casos acompanhado pelo traço 1:5 e, embora as velocidades continuem se reduzindo com o aumento da temperatura, após os 800°C seu comportamento quase que se estabiliza.

Para cada um dos traços criou-se uma linha de tendência exponencial, onde a temperatura é o fator controlável e a velocidade do pulso ultrassônico a variável de resposta. A equação e o coeficiente de determinação (R^2) são apresentados na Tabela 43. Todos os traços tiveram um R^2 elevado, o que mostra um bom ajuste dos dados amostrais à equação de regressão (RIBEIRO; TEN CATEN, 2003). Como o comportamento é similar entre os traços, apresenta-se uma equação geral para todos.

Tabela 43: Ultrassom – regressão: equações e R^2

Traço	Equação	R^2
CC 1:3,5	$v = 5092,7e^{-0,001t}$	0,9655
CC 1:5	$v = 4987,8e^{-0,002t}$	0,9600
CC 1:6,5	$v = 4980,9e^{-0,002t}$	0,9391
CAA VMA 1:3,5	$v = 4906,1e^{-0,001t}$	0,9836
CAA VMA 1:5	$v = 4823,1e^{-0,002t}$	0,9635
CAA VMA 1:6,5	$v = 4590,7e^{-0,002t}$	0,9469

continua

continuação

Traço	Equação	R ²
CAA NP 1:3,5	$v = 5065,1e^{-0,001t}$	0,9694
CAA NP 1:5	$v = 4828,9e^{-0,002t}$	0,9559
CAA NP 1:6,5	$v = 4871,5e^{-0,002t}$	0,9581
Geral	$v = 4893,9e^{-0,002t}$	0,9635

(fonte: elaborado pelo autor)

5.3.4 Resistência à compressão após aquecimento

Após serem realizados os ensaios não destrutivos, procedeu-se com os ensaios destrutivos. A resistência média à compressão foi calculada para todos os patamares de aquecimento com os resultados de 3 CPs não submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade. As resistências médias à compressão em função dos traços são apresentadas na Figura 47, enquanto os dados base são apresentados no APÊNDICE I.

Confirma-se o comportamento conhecido e já observado nas curvas de dosagem, de que as resistências diminuem à medida que o “m” aumenta, em função de fatores como relação água/cimento e porosidade. Os dados para a temperatura ambiente apresentados neste item (5.3.3) variam em relação aos do item 5.1.2, visto que também foram ensaiados CPs não aquecidos nesta etapa, desta forma não apenas a variabilidade entre os CPs, mas o pequeno avanço na idade podem ser a causa da variação. Os CPs foram moldados especificamente para este objetivo, pois assim garantiu-se resultados mais condizentes com a idade de ensaio dos CPs que sofreram aquecimento.

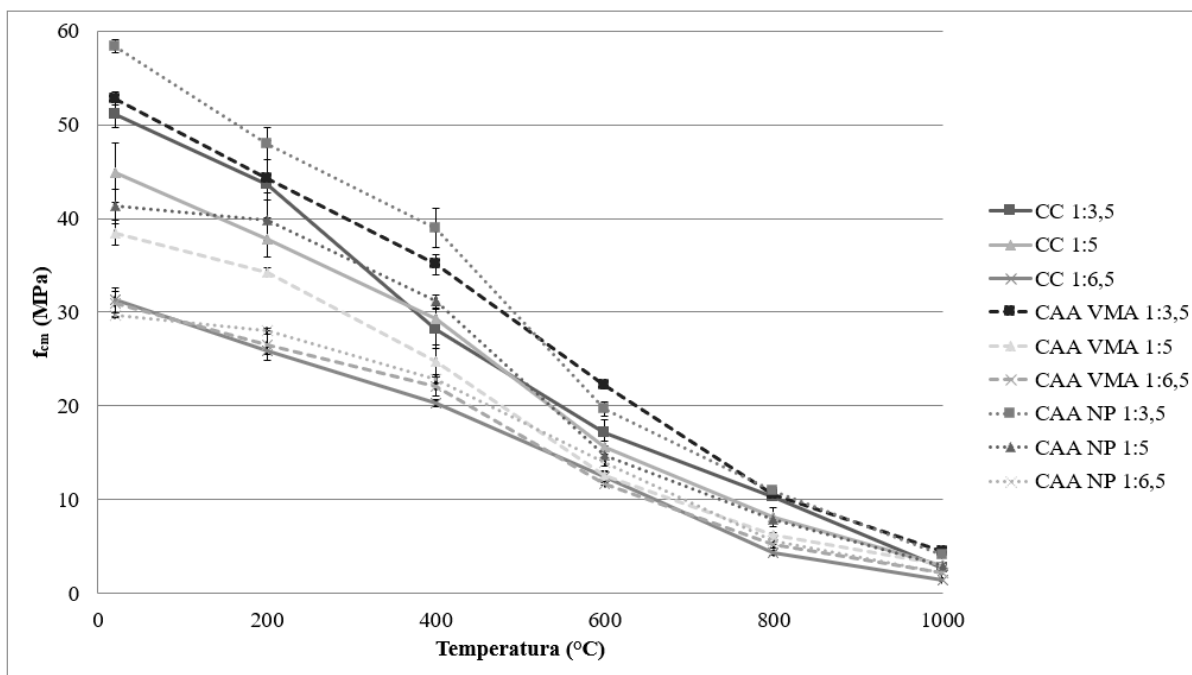


Figura 47: Resistência média à compressão após aquecimento

(fonte: elaborado pelo autor)

A NBR 15200 (ABNT, 2012) apresenta fatores de redução da resistência para concretos de massa específica normal (2000 kg/m^3 a 2800 kg/m^3) produzidos com agregados predominantemente silicosos em sua Tabela 1. Objetivando-se uma melhor interpretação dos dados, novamente realiza-se a normalização dos resultados, essa etapa permite analisar proporcionalmente a resistência residual de cada traço, permitindo também comparar os resultados da pesquisa com os da referida norma. Na Tabela 44 são apresentadas as resistências médias à compressão normalizadas, as quais são denominadas fator de redução da resistência em função da temperatura ($k_{c,\theta}$), adicionalmente na última coluna incorporaram-se os valores da NBR 15200 (ABNT, 2012). Os valores destacados são aqueles que estão abaixo dos valores indicados pela norma.

Tabela 44: Fatores de redução da resistência em função da temperatura

Temperatura (°C)	CC 1:3,5	CC 1:5	CC 1:6,5	CAA VMA 1:3,5	CAA VMA 1:5	CAA VMA 1:6,5	CAA NP 1:3,5	CAA NP 1:5	CAA NP 1:6,5	NBR 15200
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,85	0,84	0,83	0,84	0,89	0,86	0,82	0,96	0,94	0,95
400	0,55	0,65	0,65	0,66	0,64	0,71	0,67	0,75	0,77	0,75
600	0,33	0,35	0,40	0,42	0,33	0,38	0,34	0,36	0,47	0,45
800	0,20	0,18	0,14	0,20	0,16	0,17	0,19	0,19	0,19	0,15
1000	0,05	0,07	0,05	0,09	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04

(fonte: elaborado pelo autor)

Os fatores $k_{c,\theta}$ são calculados conforme a fórmula 5.1 apresentada na NBR 15200 (ABNT, 2012). Entretanto utilizou-se a resistência média e não a característica.

$$k_{c,\theta} = \frac{f_{c,\theta}}{f_{cm}} \quad (5.1)$$

Onde:

$k_{c,\theta}$ – é o fator de redução da resistência do concreto na temperatura θ ;

$f_{c,\theta}$ – é a resistência à compressão do concreto na temperatura θ ;

f_{cm} – é a resistência média à compressão do concreto à temperatura ambiente.

Apresentam-se na Figura 48 as curvas dos fatores de redução de cada um dos traços ensaiados e, também, a curva apresentada na NBR 15200 (ABNT, 2012). Destaca-se que a norma apresenta fatores de redução a partir da temperatura ambiente até a temperatura de 1200°C, para todas as centenas intermediárias, enquanto a pesquisa apresenta resultados para temperatura ambiente, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C e 1000°C.

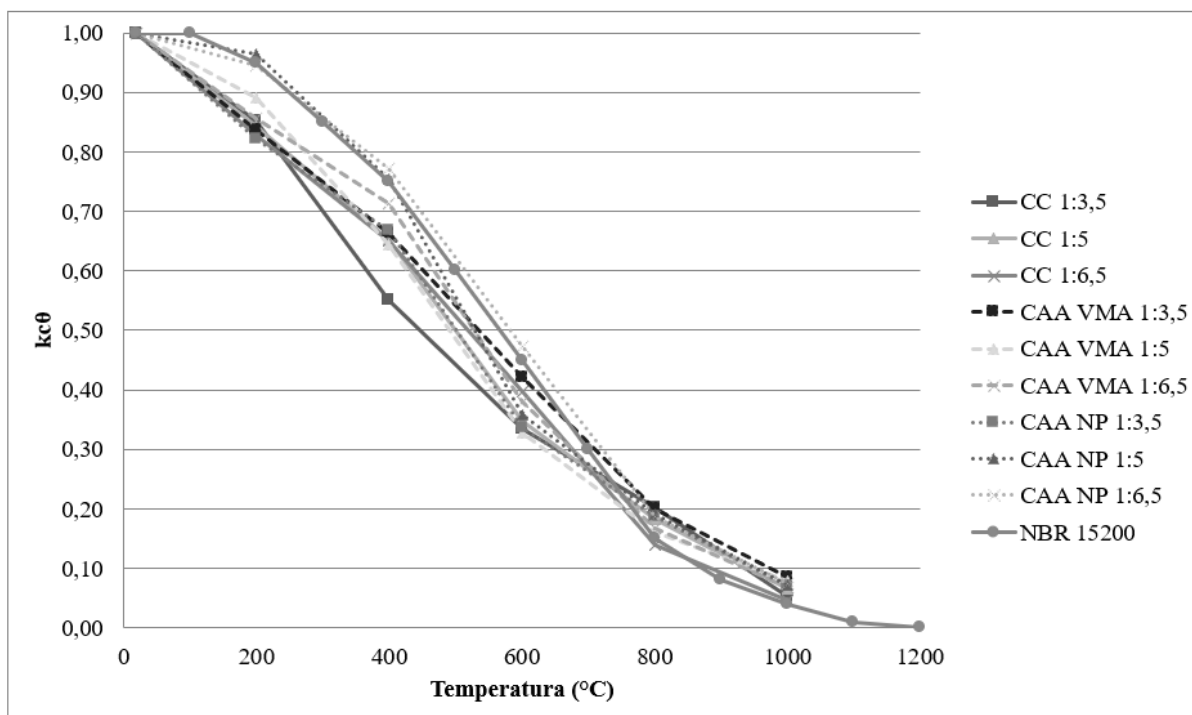


Figura 48: Curvas dos fatores de redução da resistência em função da temperatura

(fonte: elaborado pelo autor)

Na Figura 48 é possível observar que os fatores de redução determinados para a maioria dos concretos até os 800°C é menor do que os apresentados pela NBR 15200 (ABNT, 2012), com exceção do CAA NP 1:5 aos 200°C e dos CAA NP 1:5 e CAA NP 1:6,5 aos 400°C. Após os 800°C, com exceção do CC 1:6,5, todos os concretos apresentaram fatores de redução maiores.

O padrão observado nos resultados aponta condições menos favoráveis à segurança, pelo menos para exposições até os 600°C. A NBR 15200 (ABNT, 2012) indica os fatores de redução como sendo aplicáveis para concretos preparados predominantemente com agregados silicosos. Essa descrição leva a crer que a utilização de agregado graúdo basáltico utilizado na pesquisa seja um dos motivos para essa divergência, embora o agregado miúdo, areia quartzosa, enquadre-se na descrição de material silicoso. Outros fatores, que poderiam ser cogitados para as variações, como relação água/cimento, adensamento, condições de cura, dimensões dos agregados, aditivos e adições não são comentados pela norma.

Com a finalidade de avaliar a significância dos fatores controláveis na variável de resposta, realizou-se uma análise de variância entre grupos (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. Adotou-se um nível de significância de 5% para avaliar a relação de significância

entre as variáveis, desta forma considerou-se a relação como estatisticamente significativa para valores de probabilidade inferiores a 0,05, representando um intervalo de confiança de 95%. Os valores utilizados para a análise de variância foram os fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura. Essa decisão teve como objetivo eliminar a variabilidade existente em relação às diferentes resistências iniciais à temperatura ambiente. Na Tabela 45 são apresentados os resultados obtidos na análise ANOVA.

Tabela 45: Análise ANOVA para fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Concreto (A)	0,044	2	0,022	30,55	0,000000000031	S
Traço (B)	0,014	2	0,007	9,85	0,000117582236	S
Temperatura (C)	19,384	5	3,877	5353,13	0,000000000000	S
A x B	0,026	4	0,007	9,10	0,000002252945	S
A x C	0,043	10	0,004	6,00	0,000000341047	S
B x C	0,067	10	0,007	9,22	0,000000000070	S
A x B x C	0,179	20	0,009	12,34	0,000000000000	S
Erro	0,078	108	0,001	-	-	-
Total	19,836	161	-	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Todos os fatores controláveis influenciaram significativamente a resistência residual à compressão dos concretos, por ordem de significância apresentaram maior influência: temperatura (C), interação (A x B x C), concreto (A), interação (B x C), interação (A x C), interação (A x B) e traço (B). A temperatura de exposição, como esperado, foi o fator mais importante para a redução da resistência.

Realizando-se comparação múltipla de médias, verificando se a diferença entre elas supera o limite de decisão determinado, 0,0466, é possível estabelecer que médias diferem entre si. Assim valores de diferença menores que o limite de decisão permitem afirmar que não há diferença significativa entre as médias.

Destaca-se que, ao normalizar os resultados, cria-se artificialmente a condição ideal de todos os concretos terem sido produzidos com exatamente a mesma resistência, independentemente de ser concreto convencional ou concreto autoadensável. Esse fato faz com que as médias, em temperatura ambiente, sejam todas iguais a um, não sendo necessário apresentar o resultado para a temperatura ambiente, pois produz-se como resultado que todos são iguais.

Os resultados para os traços, 1:3,5, 1:5 e 1:6,5 são apresentados na Tabela 46, Tabela 47 e Tabela 48 respectivamente.

Tabela 46: Comparação múltipla de médias - fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura – traço 1:3,5

Traço (B)	Temperatura (C)	Concretos (A)	Diferença	Resultado
1:3,5	200°C	CC – CAA VMA	0,0153	Iguais
		CC – CAA NP	0,0309	Iguais
		CAA VMA – CAA NP	0,0156	Iguais
	400°C	CC – CAA VMA	-0,1133	Diferentes
		CC – CAA NP	-0,1169	Diferentes
		CAA VMA – CAA NP	-0,0036	Iguais
	600°C	CC – CAA VMA	-0,0858	Diferentes
		CC – CAA NP	-0,0020	Iguais
		CAA VMA – CAA NP	0,0837	Diferentes
	800°C	CC – CAA VMA	0,0014	Iguais
		CC – CAA NP	0,0142	Iguais
		CAA VMA – CAA NP	0,0128	Iguais
1000°C	CC – CAA VMA	-0,0323	Iguais	
	CC – CAA NP	-0,0174	Iguais	
	CAA VMA – CAA NP	0,0149	Iguais	

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se para o traço 1:3,5 que, estatisticamente, os três concretos apresentam o mesmo comportamento para exposições a 200°C. Entre as temperaturas de 400°C e 600°C não há um padrão de comportamento bem definido, apenas o CC em relação ao CAA VMA mantém comportamentos diferentes para as duas temperaturas. Entretanto, após exposições a 800°C e 1000°C, onde os concretos já apresentam baixa resistência à compressão residual, tendo

fatores de redução da resistência em função da temperatura similares, os concretos são todos considerados iguais entre si para a mesma temperatura de exposição.

Tabela 47: Comparação múltipla de médias - fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura – traço 1:5

Traço (B)	Temperatura (C)	Concretos (A)	Diferença	Resultado
1:5	200°C	CC - CAA VMA	-0,0496	Diferentes
		CC - CAA NP	-0,1215	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,0719	Diferentes
	400°C	CC - CAA VMA	0,0101	Iguais
		CC - CAA NP	-0,1010	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,1111	Diferentes
	600°C	CC - CAA VMA	0,0197	Iguais
		CC - CAA NP	-0,0107	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	-0,0304	Iguais
	800°C	CC - CAA VMA	0,0202	Iguais
		CC - CAA NP	-0,0091	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	-0,0294	Iguais
1000°C	CC - CAA VMA	-0,0129	Iguais	
	CC - CAA NP	-0,0063	Iguais	
	CAA VMA - CAA NP	0,0067	Iguais	

(fonte: elaborado pelo autor)

Estatisticamente, para o traço 1:5 os três concretos apresentam comportamentos diferentes para exposições a 200°C, diferentemente do observado para o traço 1:3,5. Entre as temperaturas de 400°C e 600°C não há um padrão de comportamento bem definido, apenas o CC em relação ao CAA VMA mantém comportamento igual para as duas temperaturas, o que diverge dos resultados encontrados para o traço 1:3,5. Entretanto, após exposições a 800°C e 1000°C, os concretos são todos considerados iguais entre si para a mesma temperatura de exposição.

Tabela 48: Comparação múltipla de médias - fatores de redução da resistência à compressão em função da temperatura – traço 1:6,5

Traço (B)	Temperatura (C)	Concretos (A)	Diferença	Resultado
1:6,5	200°C	CC - CAA VMA	-0,0291	Iguais
		CC - CAA NP	-0,1163	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,0873	Diferentes
	400°C	CC - CAA VMA	-0,0644	Diferentes
		CC - CAA NP	-0,1224	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,0579	Diferentes
	600°C	CC - CAA VMA	0,0185	Iguais
		CC - CAA NP	-0,0750	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,0934	Diferentes
	800°C	CC - CAA VMA	-0,0283	Iguais
		CC - CAA NP	-0,0480	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,0197	Iguais
	1000°C	CC - CAA VMA	-0,0220	Iguais
		CC - CAA NP	-0,0272	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	-0,0052	Iguais

(fonte: elaborado pelo autor)

Para o traço 1:6,5, exposições a 200°C, estatisticamente o CAA NP comporta-se diferente dos outros dois concretos, o que se assemelha aos resultados do traço 1:5. Entre as temperaturas de 400°C e 600°C todos os concretos têm comportamentos diferentes, com exceção do CC e CAA VMA para os 600°C. Novamente, para temperaturas de 800°C e 1000°C todos os concretos apresentam comportamentos estatisticamente iguais, com exceção dos CC e CAA NP para os 800°C, entretanto a diferença entre as médias apresenta valor próximo ao do limite de decisão, o que pode tornar essa classificação pontual discutível.

Observa-se que, para temperaturas entre 200°C e 600°C, os CAA NP tendem a ser estatisticamente diferentes do CC e do CAA VMA, enquanto estes últimos apresentam maior similaridade entre eles. A existência de diferença estatística significa que há uma diferença maior do que a que poderia ser explicada pelo ruído experimental, entretanto, se o ruído é muito baixo, essa diferença pode ser estatisticamente observada, embora pequena a ponto de ser desprezível.

O comportamento que fica claro entre todas as observações feitas é de que após os 800°C todos os concretos apresentam comportamento semelhante, resultado esperado em função da já baixa resistência à compressão, fato vinculado a exposições acima dos 600°, temperatura considerada crítica para os efeitos deletérios das altas temperaturas sobre o material, vinculado principalmente ao segundo pico de decomposição do C-S-H próximo dos 720°C.

A conclusão a que se chega é de que, uma vez evitado o *spalling*, os concretos convencionais e concretos autoadensáveis apresentam resposta similar à exposição a altas temperaturas, embora para os 400°C e 600°C existam variações entre os traços. Autores como Aslani e Samali (2013) e Person (2004) também concluíram que, quando não há ocorrência de *spalling*, os concretos convencionais e autoadensáveis apresentam respostas similares às altas temperaturas.

Também é possível correlacionar a resistência normalizada, apresentada na Figura 48 e a velocidade de pulso ultrassônico normalizada, encontrada na Tabela 42. As curvas representativas das médias normalizadas dos resultados de todos os traços de ambas as características, apresentadas na Figura 49, permitem verificar que há comportamentos muito parecidos para ambas as propriedades até a temperatura de 600°C.

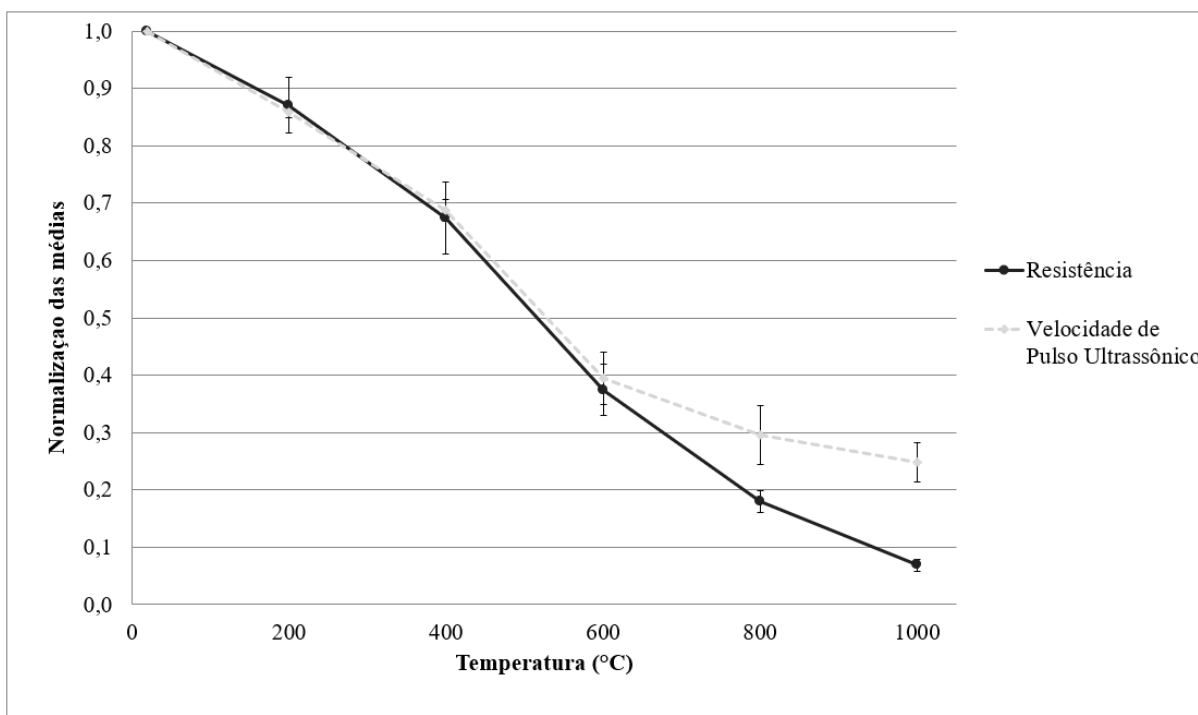


Figura 49: Resistência x velocidade de pulso ultrassônico

(fonte: elaborado pelo autor)

Microfissuras na zona de transição entre a matriz da pasta de cimento e o agregado graúdo faz do concreto um material complexo para a previsão da resistência através de relações entre resistência e porosidade. E essa afirmação permite inferir que o afastamento das curvas a partir dos 600°C deve-se não apenas ao aumento da porosidade; pois, baseado nisto, deveria ser acompanhado pela diminuição da VPU. Buscando-se outras explicações, parece ser correto concluir que a causa do afastamento das curvas é a decomposição do C-S-H, fase mais importante na determinação das propriedades da pasta (MEHTA, MONTEIRO, 2014), próximo aos 700 °C. Segundo Fernandes *et al.* (2017) o C-S-H se decompõe em $\beta - C_2S$ (belita), βCS (wollastonita) e água, causando retração da pasta de cimento e redução significativa da resistência.

5.3.5 Módulo de elasticidade ambiente e após aquecimento

A determinação do módulo de elasticidade seguiu a Metodologia A – Tensão σ_a Fixa apresentada pela NBR 8522 (ABNT, 2017b). A norma exige que a “resistência à compressão do concreto (f_c) deve ser determinada pela média dos resultados de no mínimo dois corpos de prova similares”, na pesquisa determinou-se pela média de 3 corpos de prova. Os resultados individuais de cada corpo de prova ($E_{ci,i}$), bem como sua validação de acordo com a

tolerância exigida pela NBR 8522 (ABNT, 2017b), são apresentados no APÊNDICE J. Os resultados dos ensaios estão apresentados nas Tabela 49, Tabela 50 e Tabela 51.

Tabela 49: Módulo de elasticidade médio (GPa) - CC

Temperatura (°C)	CC 1:3,5		CC 1:5		CC1:6,5	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
20	31,52	0,15	28,23	0,41	26,82	1,04
200	21,47	0,65	20,08	0,58	17,92	0,18
400	11,68	0,09	11,83	1,01	10,93	0,19
600	4,05	0,43	4,54	0,50	2,85	0,01
800	3,30	0,74	3,33	-	2,04	0,05
1000	2,45	0,21	2,49	-	0,64	0,03

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 50: Módulo de elasticidade médio (GPa) - CAA VMA

Temperatura (°C)	CAA VMA 1:3,5		CAA VMA 1:5		CAA VMA 1:6,5	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
20	31,52	0,98	28,85	0,65	23,73	0,56
200	21,98	1,02	21,29	0,46	17,03	0,26
400	13,58	0,10	11,88	0,26	10,26	0,14
600	6,78	0,12	3,47	0,12	2,90	0,07
800	3,87	0,08	2,08	0,02	2,15	0,06
1000	2,69	0,09	2,30	0,12	2,21	0,08

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 51: Módulo de elasticidade médio (GPa) - CAA NP

Temperatura (°C)	CAA NP 1:3,5		CAA NP 1:5		CAA NP 1:6,5	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
20	32,28	0,78	26,67	0,66	25,68	0,19
200	24,40	0,80	20,60	0,32	18,18	0,58
400	13,74	0,30	12,20	0,15	10,81	0,08
600	5,85	0,26	3,34	0,10	4,40	0,16
800	4,15	0,14	3,01	0,07	2,46	0,05
1000	2,76	0,09	2,32	0,05	2,42	0,06

(fonte: elaborado pelo autor)

Com o objetivo de comparar os valores residuais do módulo de elasticidade para cada traço, normalizou-se cada um deles individualmente, os valores são apresentados na Tabela 52. A título de comparação, na última coluna estão inseridos os valores apresentados por versão anterior da NBR 15200 (ABNT, 2012), já que a versão atual não apresenta esses resultados.

Tabela 52: Módulos de elasticidade normalizados

Temperatura (°C)	CC 1:3,5	CC 1:5	CC 1:6,5	CAA VMA 1:3,5	CAA VMA 1:5	CAA VMA 1:6,5	CAA NP 1:3,5	CAA NP 1:5	CAA NP 1:6,5	NBR 15200 (2004)
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,68	0,71	0,67	0,70	0,74	0,72	0,76	0,77	0,71	0,94
400	0,37	0,42	0,41	0,43	0,41	0,43	0,43	0,46	0,42	0,72
600	0,13	0,16	0,11	0,21	0,12	0,12	0,18	0,13	0,17	0,36
800	0,10	0,12	0,08	0,12	0,07	0,09	0,13	0,11	0,10	0,07
1000	0,08	0,09	0,02	0,09	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,00

(fonte: elaborado pelo autor)

Autores como Fares *et al.* (2009b) afirmam que o módulo de elasticidade é afetado já em aquecimentos a partir dos 20°C. Segundo Malhorta (1982) *apud* Aslani e Samali (2013) o módulo de elasticidade do concreto é basicamente influenciado pelos mesmos fatores que afetam a resistência à compressão. Entretanto, observa-se a redução mais acentuada do módulo de elasticidade quando comparado ao valor da resistência à compressão exposto na

Tabela 21, e confirmada para todos os traços da pesquisa, embora não nas mesmas proporções, e excluindo-se pequena divergência para os 1000°C, conforme dados apresentados na Tabela 53. Ambos os valores foram determinados de maneira simplificada com a média dos fatores de redução de todos os 9 traços.

Tabela 53: Valores das relações $f_{c,\theta}/f_{c,m}$ e $E_{c,\theta}/E_c$ para concretos produzidos

Temperatura (°C)	$E_{c,\theta}/E_c$		$f_{c,\theta}/f_{c,m}$	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
20	1,00	0,00	1,00	0,00
200	0,72	0,03	0,87	0,05
400	0,42	0,02	0,67	0,07
600	0,15	0,04	0,37	0,05
800	0,10	0,02	0,18	0,02
1000	0,08	0,02	0,07	0,01

(fonte: elaborado pelo autor)

Buscando-se a melhor compreensão das diferenças observadas entre os resultados obtidos e as relações estabelecidas pela antiga norma, apresenta-se a Figura 50. A expressão dos resultados de forma gráfica facilita constatar a perda significativa do módulo de elasticidade já nas temperaturas mais baixas, sendo que o módulo de elasticidade residual é menor do que o indicado pela norma até os 600°C. As posições invertem-se a partir dos 800°C, entretanto, os valores já são praticamente insignificantes.

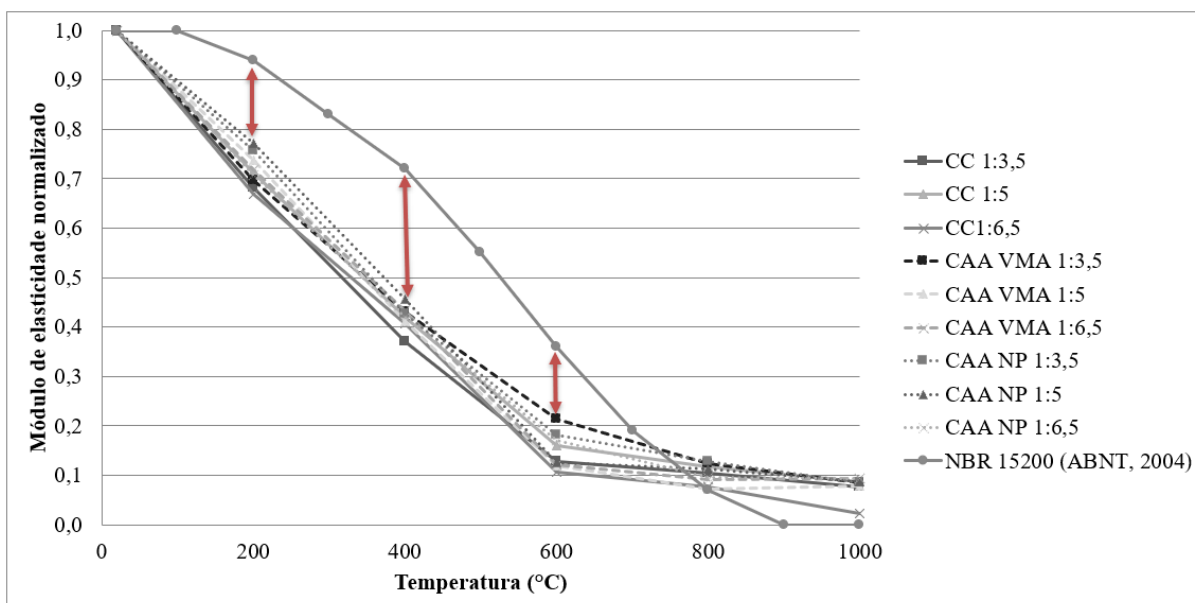


Figura 50: Módulos de elasticidade normalizados após aquecimentos

(fonte: elaborado pelo autor)

É interessante perceber a diferença estabelecida entre as taxas de redução por intervalo de temperatura. Para o intervalo entre 100°C e 200°C constatou-se uma taxa de aproximadamente -0,157 GPa/°C, enquanto a NBR 15200 (ABNT, 2004) tem valor próximo a -0,03 GPa/°C. As curvas originais, bem como suas taxas de redução são apresentadas na Figura 51.

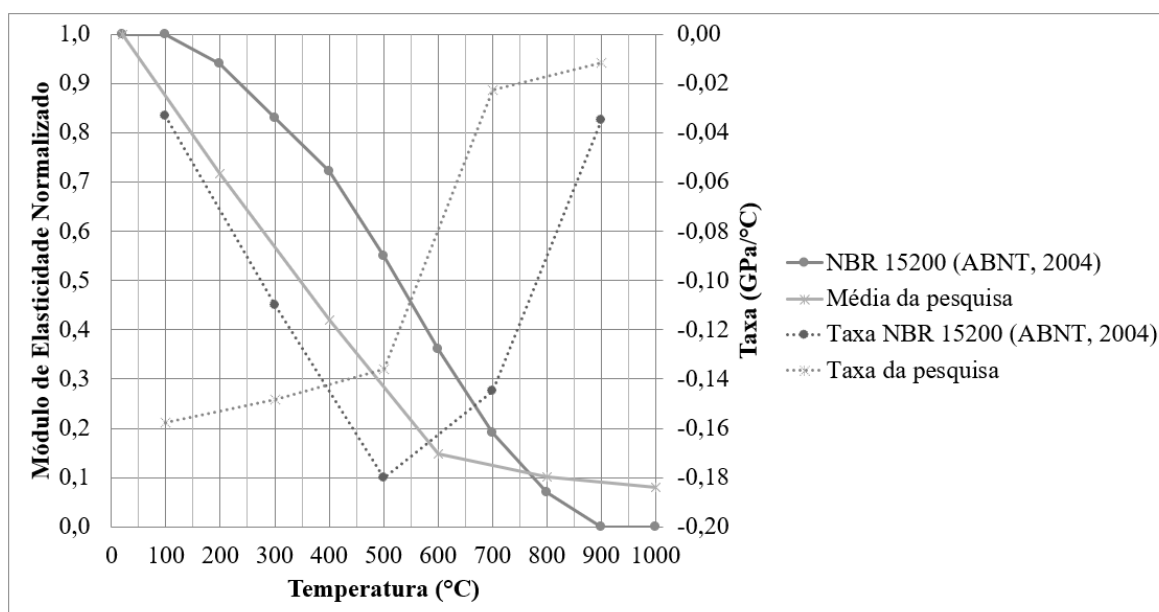


Figura 51: Módulos de elasticidade após aquecimentos e taxas de redução

(fonte: elaborado pelo autor)

Complementando-se as constatações feitas ao se compararem a Tabela 52 e Tabela 53 é apresentada a Figura 52. Esta figura, ao expor as curvas para evolução do módulo de elasticidade, indicadas com a letra “E”, e da resistência à compressão, ambas em relação às altas temperaturas, explicitam as tendências já descritas, de maior redução para os módulos em relação às resistências. Fato que vários autores observaram, desde pesquisas mais antigas, Schneider (1988), até mais recentes, Kakae *et al.* (2017).

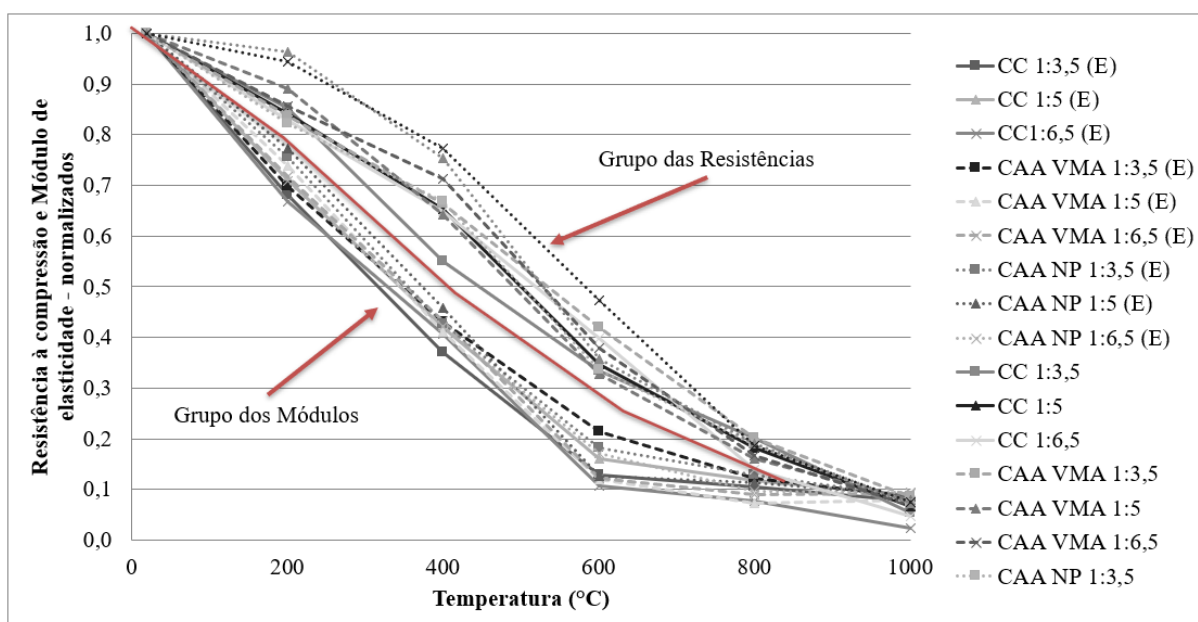


Figura 52: Curvas de evolução de módulo de elasticidade e de resistência à compressão em função da temperatura

(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se no comportamento dos concretos produzidos o módulo de elasticidade sempre maior para o traço 1:3,5, o que é de se esperar devido à menor relação água/cimento, conseqüentemente maior resistência à compressão.

O comportamento observado é semelhante ao observado por Fares *et al.* (2009b), ao afirmar que as evoluções dos módulos de elasticidade são similares para o concreto convencional e os concretos autoadensáveis analisados pelos autores, embora o concreto convencional apresente um decréscimo ligeiramente maior no intervalo até os 150°C. Comportamento que é observado na Tabela 52 onde consta um maior decréscimo para o concreto convencional no intervalo até 200°C.

A inflexão observada no gráfico da Figura 50 nos 600°C pode ser explicada por fenômenos químicos e físicos no material. Outros autores, como Mendes *et al.* (2007), constataram uma intensificação da diminuição não só do módulo de elasticidade como também da resistência mecânica para concretos aquecidos acima dos 400°C. De acordo com os autores, os concretos, transcorridos dias após o aquecimento, começaram a apresentar fissuração intensa e até desintegração, fato que foi associado à dissociação da portlandita (hidróxido de cálcio) ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando óxido de cálcio (CaO) e água (H_2O) e gerando uma contração do concreto. Entretanto, ao se resfriar, o concreto reabsorve umidade do ar, a reação se reverte, e a formação de portlandita é expansiva, o que poderia ser a causa das fissuras e até da desintegração. Outras informações sobre a microestrutura do concreto podem ser encontradas no item 5.3.6.

Com a finalidade de avaliar a significância dos fatores controláveis na variável de resposta, realizou-se uma análise de variância entre grupos (ANOVA) para experimento fatorial com 3 fatores. Adotou-se nível de significância de 5% para avaliar a relação de significância entre as variáveis, desta forma considerou-se a relação como estatisticamente significativa para valores de probabilidade inferiores a 0,05, representando um intervalo de confiança de 95%, da mesma forma que para os resultados de resistência à compressão em função da temperatura. Utilizaram-se para a análise de variância os fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura. Essa decisão teve como objetivo eliminar a variabilidade existente em relação aos diferentes módulos de elasticidade iniciais à temperatura ambiente. De forma a tornar a análise estatística mais eficiente, os valores para os 1000°C, temperatura na qual o módulo de elasticidade residual é estruturalmente desprezível, foram removidos da análise de variância.

Foram realizadas duas análises de variância, a primeira delas é apresentada na Tabela 54, para esta ANOVA foram reinseridos todos os dados que, segundo a NBR 8522 (ABNT, 2017b), deveriam ser desconsiderados por critérios de tolerância da própria norma. Para a produção da segunda ANOVA, apresentada na Tabela 55, os dados removidos de acordo com os critérios da NBR 8522 (ABNT, 2017b) foram substituídos pela média ou repetição dos resultados obtidos para cada conjunto de amostras, dependendo do número de resultados remanescentes disponível.

Para a análise realizada com todos os dados coletados em laboratório, Tabela 54, os fatores controláveis que influenciaram significativamente a resistência residual à compressão dos concretos, por ordem de significância apresentaram maior influência: temperatura (C), interação (A x B x C), concreto (A), interação (B x C), interação (A x B). Apresentaram resultado não significativo a interação (A x C) e o traço (B).

Tabela 54: Análise ANOVA para fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura - dados coletados em laboratório

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Concreto (A)	0,014	2	0,007	12,57	0,000017607425	S
Traço (B)	0,001	2	0,000	0,69	0,502171523751	NS
Temperatura (C)	15,763	5	3,153	5538,66	0,000000000000	S
A x B	0,008	4	0,002	3,52	0,010596747874	S
A x C	0,007	10	0,001	1,31	0,240343035249	NS
B x C	0,019	10	0,002	3,40	0,000941785072	S
A x B x C	0,054	20	0,003	4,78	0,000000215772	S
Erro	0,046	81	0,001	-	-	-
Total	15,914	134	-	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Enquanto que para a análise realizada com a reposição dos dados excluídos, Tabela 55, todos os fatores controláveis influenciaram significativamente o módulo de elasticidade residual dos concretos, por ordem de significância apresentaram maior influência: temperatura (C), interação (A x B x C), concreto (A), interação (B x C), interação (A x B), traço (B) e interação (A x C). Também para o módulo de elasticidade, em ambas as análises, a temperatura de exposição, como esperado, foi o fator mais significativo sobre a propriedade avaliada.

Tabela 55: Análise ANOVA para fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura - reposição de dados excluídos

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade	SIG
Concreto (A)	0,016	2	0,008	35,76	0,0000000000007	S
Traço (B)	0,006	2	0,003	13,62	0,000007974858	S
Temperatura (C)	15,740	5	3,148	13872,50	0,0000000000000	S
A x B	0,010	4	0,002	10,87	0,000000417614	S
A x C	0,010	10	0,001	4,54	0,000041597068	S
B x C	0,019	10	0,002	8,16	0,000000005561	S
A x B x C	0,059	20	0,003	13,00	0,0000000000000	S
Erro	0,018	81	0,000	-	-	-
Total		134	-	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

Destaca-se que, ao normalizar os resultados, cria-se artificialmente a condição ideal de todos os concretos terem sido produzidos com exatamente o mesmo módulo de elasticidade, independentemente de ser concreto convencional ou concreto autoadensável. Esse fato faz com que as médias, em temperatura ambiente, sejam todas iguais a um, não sendo necessário apresentar o resultado para a temperatura ambiente, pois produz-se como resultado que todos são iguais.

Realizando-se comparação múltipla de médias para os dados coletados e para os dados com reposição, verificando se a diferença entre elas supera os limites de decisão, respectivamente 0,0413 e 0,0261, é possível estabelecer quais médias diferem entre si. Assim valores de diferença menores que o limite de decisão permitem afirmar que não há diferença significativa entre as médias. Os resultados para os traços, 1:3,5, 1:5 e 1:6,5 são apresentados na Tabela 56, Tabela 57 e Tabela 58 respectivamente.

Tabela 56: Comparação múltipla de médias - fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura – traço 1:3,5

Traço (B)	Temperatura (C)	Concretos (A)	Dados Coletados		Reposição	
			Diferença	Resultado	Diferença	Resultado
1:3,5	200	CC - CAA VMA	-0,016	Iguais	-0,016	Iguais
		CC - CAA NP	-0,055	Diferentes	-0,074	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,039	Iguais	-0,058	Diferentes
	400	CC - CAA VMA	-0,060	Diferentes	-0,060	Diferentes
		CC - CAA NP	-0,055	Diferentes	-0,055	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	0,005	Iguais	0,005	Iguais
	600	CC - CAA VMA	-0,087	Diferentes	-0,087	Diferentes
		CC - CAA NP	-0,053	Diferentes	-0,053	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	0,034	Iguais	0,034	Diferentes
	800	CC - CAA VMA	-0,018	Iguais	-0,018	Iguais
		CC - CAA NP	-0,024	Iguais	-0,024	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	-0,006	Iguais	-0,006	Iguais

(fonte: elaborado pelo autor)

Quantificando-se os diferentes resultados na Tabela 56 obtém-se a diferença das análises para o traço 1:3,5 de aproximadamente 17%, enquanto para o traço 1:5, Tabela 57, as variações são de 67% e para o traço 1:6,5, Tabela 58, são nulas, sendo todos os resultados iguais. Essas divergências podem estar associadas ao fato de que manter os dados que seriam excluídos pelos critérios da NBR 8522 (ABNT, 2017b), torna o conjunto de dados mais variável, aumentando o termo do erro, desta forma pequenas divergências entre médias deixam de ser reconhecidas como estatisticamente diferentes, o que justifica o maior número de resultados “iguais” observados principalmente para o traço 1:5.

Tabela 57: Comparação múltipla de médias - fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura – traço 1:5

Traço (B)	Temperatura (C)	Concretos (A)	Dados Coletados		Reposição	
			Diferença	Resultado	Diferença	Resultado
1:5	200	CC - CAA VMA	-0,027	Iguais	-0,027	Diferentes
		CC - CAA NP	-0,038	Iguais	-0,061	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,011	Iguais	-0,034	Diferentes
	400	CC - CAA VMA	-0,013	Iguais	0,007	Iguais
		CC - CAA NP	-0,045	Diferentes	-0,038	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,031	Iguais	-0,045	Diferentes
	600	CC - CAA VMA	0,040	Iguais	0,040	Diferentes
		CC - CAA NP	0,039	Iguais	0,036	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,001	Iguais	-0,005	Iguais
	800	CC - CAA VMA	0,040	Iguais	0,046	Diferentes
		CC - CAA NP	0,006	Iguais	0,005	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	-0,034	Iguais	-0,041	Diferentes

(fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 58: Comparação múltipla de médias - fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura – traço 1:6,5

Traço (B)	Temperatura (C)	Concretos (A)	Dados Coletados		Reposição	
			Diferença	Resultado	Diferença	Resultado
1:6,5	200	CC - CAA VMA	-0,051	Diferentes	-0,049	Diferentes
		CC - CAA NP	-0,044	Diferentes	-0,040	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	0,007	Iguais	0,010	Iguais
	400	CC - CAA VMA	-0,017	Iguais	-0,025	Iguais
		CC - CAA NP	-0,007	Iguais	-0,013	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	0,010	Iguais	0,011	Iguais
	600	CC - CAA VMA	-0,020	Iguais	-0,016	Iguais
		CC - CAA NP	-0,071	Diferentes	-0,065	Diferentes
		CAA VMA - CAA NP	-0,051	Diferentes	-0,049	Diferentes
	800	CC - CAA VMA	-0,017	Iguais	-0,015	Iguais
		CC - CAA NP	-0,027	Iguais	-0,020	Iguais
		CAA VMA - CAA NP	-0,010	Iguais	-0,005	Iguais

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando-se os dados com menor erro, ou seja, aqueles nos quais foi feita a reposição, os resultados obtidos da ANOVA não apresentam padrões que se repetem nos diferentes traços (B) quando comparados os mesmos concretos (A), com exceção para a comparação entre CC e CAA NP nos 200°C e 600°C onde apresentam comportamentos “diferentes” e para os 800°C onde os comportamentos são “iguais”.

Outra comparação realizada é entre os valores de módulo de elasticidade obtidos na pesquisa por meio dos ensaios conforme a NBR 8522 (ABNT, 2017b) e os estimados conforme recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014), ambos expostos na Figura 53.

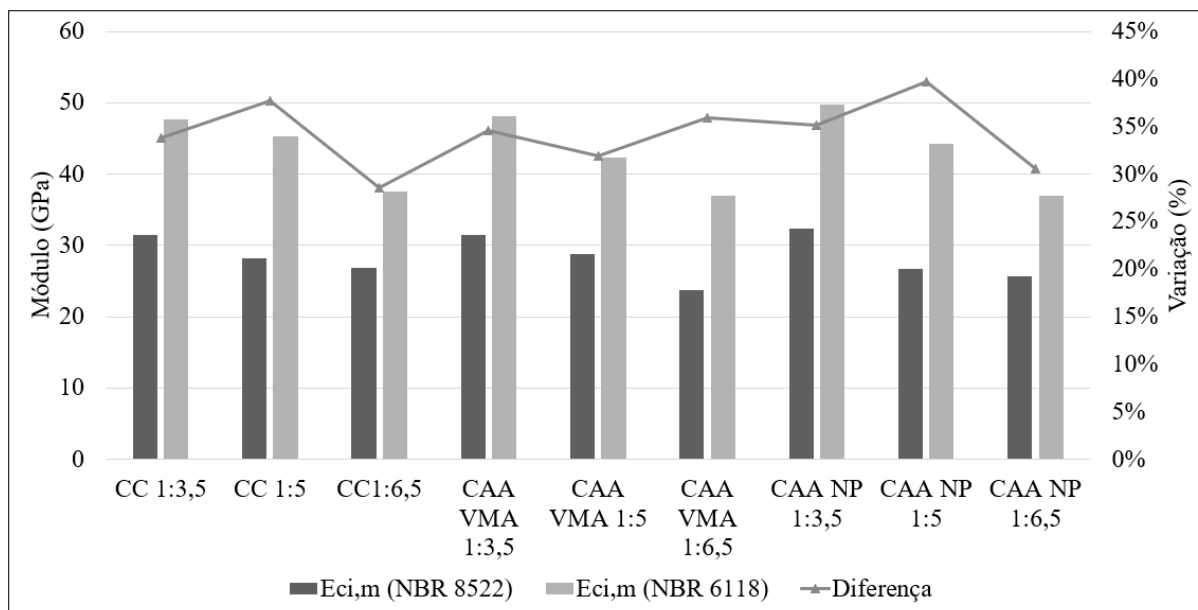


Figura 53: Módulos de elasticidade – NBR 8522 x NBR 6118

(fonte: elaborado pelo autor)

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a deformação elástica do concreto depende da composição do traço do concreto, especialmente da natureza dos agregados. Visto que se utilizam teores elevados de argamassa para produção do CAA, as retrações químicas e devidas à secagem tendem a aumentar, como os agregados graúdos são os principais responsáveis pelo módulo de elasticidade, este tende a se reduzir. Para teores de argamassa próximos aos do concreto convencional, é possível se observar desempenho ligeiramente superior, o qual pode ser atribuído ao melhor adensamento e empacotamento. De forma a buscar um melhor desempenho no módulo de elasticidade, recomenda-se dosar concretos autoadensáveis com teores de argamassa similares aos do concreto convencional (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Schneider (1988) afirma que o tipo de agregado possui uma forte influência sobre o módulo de elasticidade. Xing *et al.* (2011) comentam que, quando ainda quentes, os concretos apresentam maiores resistências e módulos de elasticidade do que após o resfriamento. Pode-se ainda considerar que as deformações térmicas podem ser significativamente irreversíveis em condições de resfriamento (SCHNEIDER, 1988).

Neville e Brooks (2013) comentam que as equações geralmente são válidas em termos gerais, e condições como a umidade do corpo de prova no momento do ensaio podem influenciar os

resultados significativamente, já que o corpo de prova úmido tem módulo mais elevado entre 3 e 4 GPa que um seco, enquanto a resistência varia em sentido oposto.

As propriedades do agregado, embora não sejam determinantes para a resistência à compressão, influenciam o valor do módulo de elasticidade. Considerando-se para o concreto o modelo compósito de duas fases, a influência do agregado vem do seu módulo de elasticidade e sua proporção volumétrica. Ou seja, quanto maior o módulo do agregado, maior o módulo do concreto; e maior o módulo do concreto quanto maior o volume de agregado, o que geralmente é a realidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

5.3.6 Difração de Raios-X (DRX)

As amostras destinadas à análise dos resultados de difração de raios-X foram produzidas no LEME. Após os ensaios destrutivos, partes de cada um dos concretos foram tratadas de maneira a produzir as amostras conforme especificações necessárias.

Analisando-se os difratogramas é possível constatar que há alterações significativas na composição do concreto após ser exposto a diferentes temperaturas, conforme mostram as Figura 54, Figura 55 e Figura 56. Os difratogramas correspondentes aos traços 1:3,5 e 1:6,5 são apresentados no APÊNDICE K. A degradação térmica tendo como base os difratogramas é bastante evidente já a partir dos 600°C, com alterações ainda mais significativas para os dois níveis superiores de temperatura.

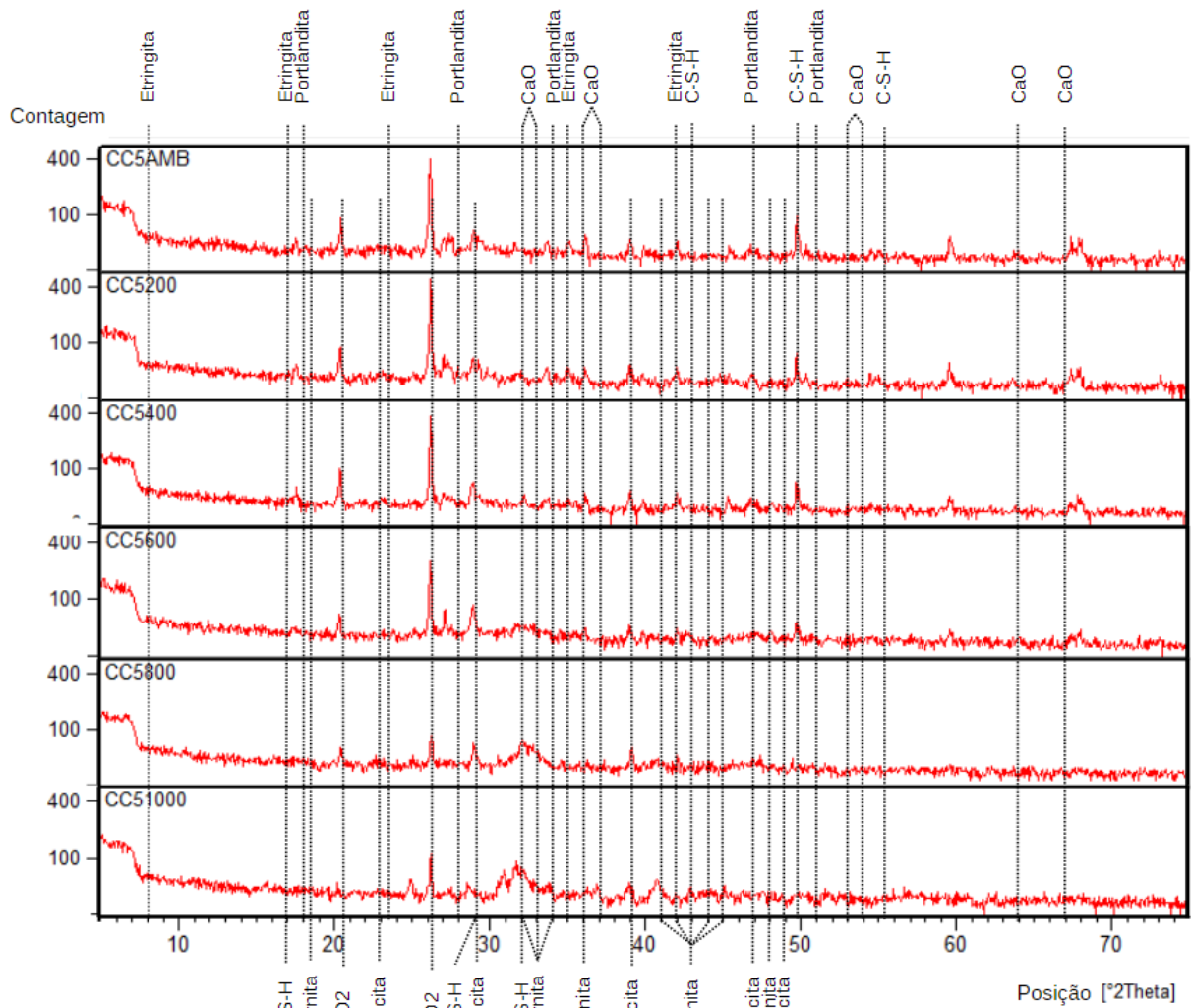


Figura 54: Difratomogramas do CC 1:5 em função da temperatura

(fonte: elaborado pelo autor)

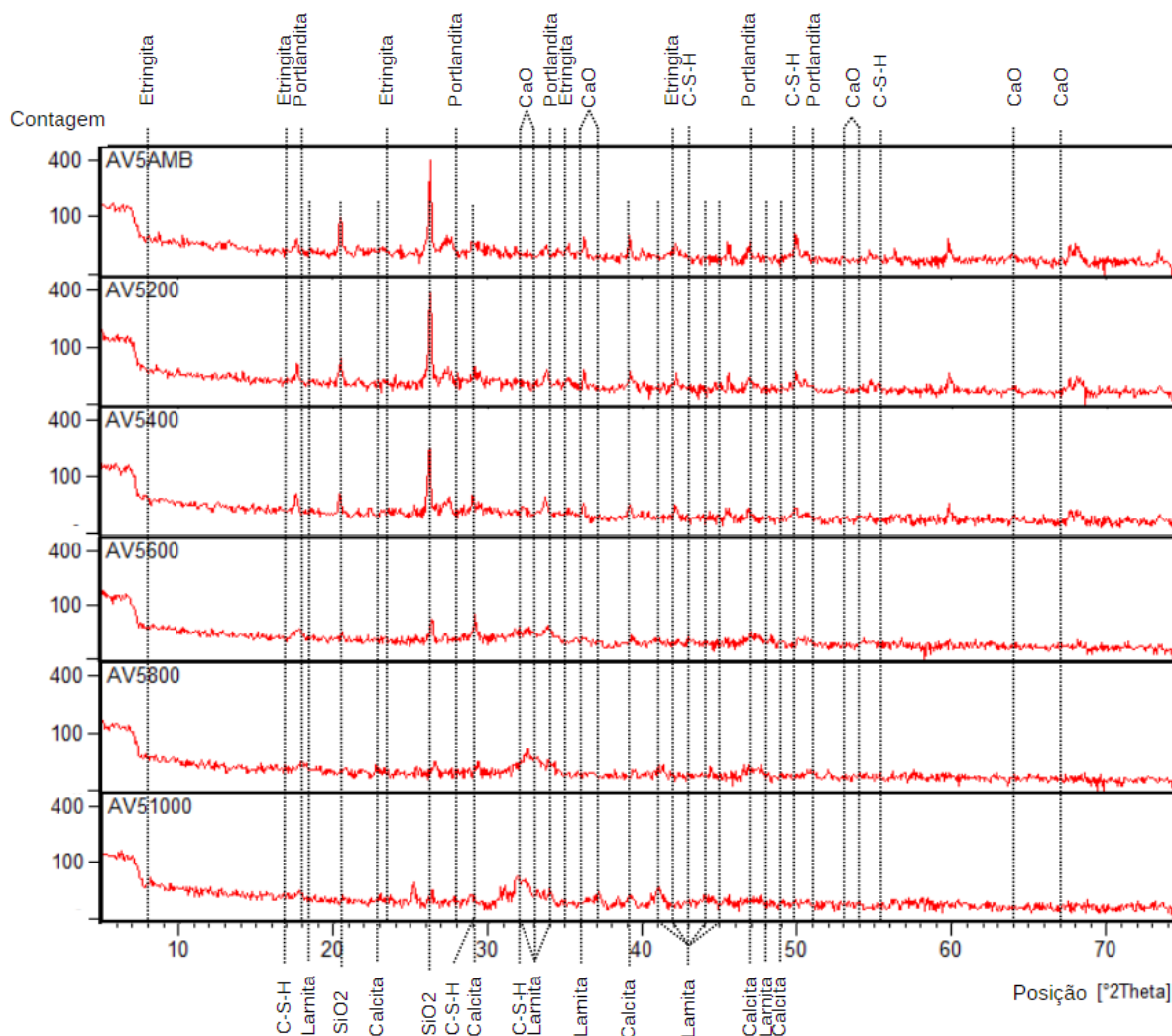


Figura 55: Difratogramas do CA VMA 1:5 em função da temperatura

(fonte: elaborado pelo autor)

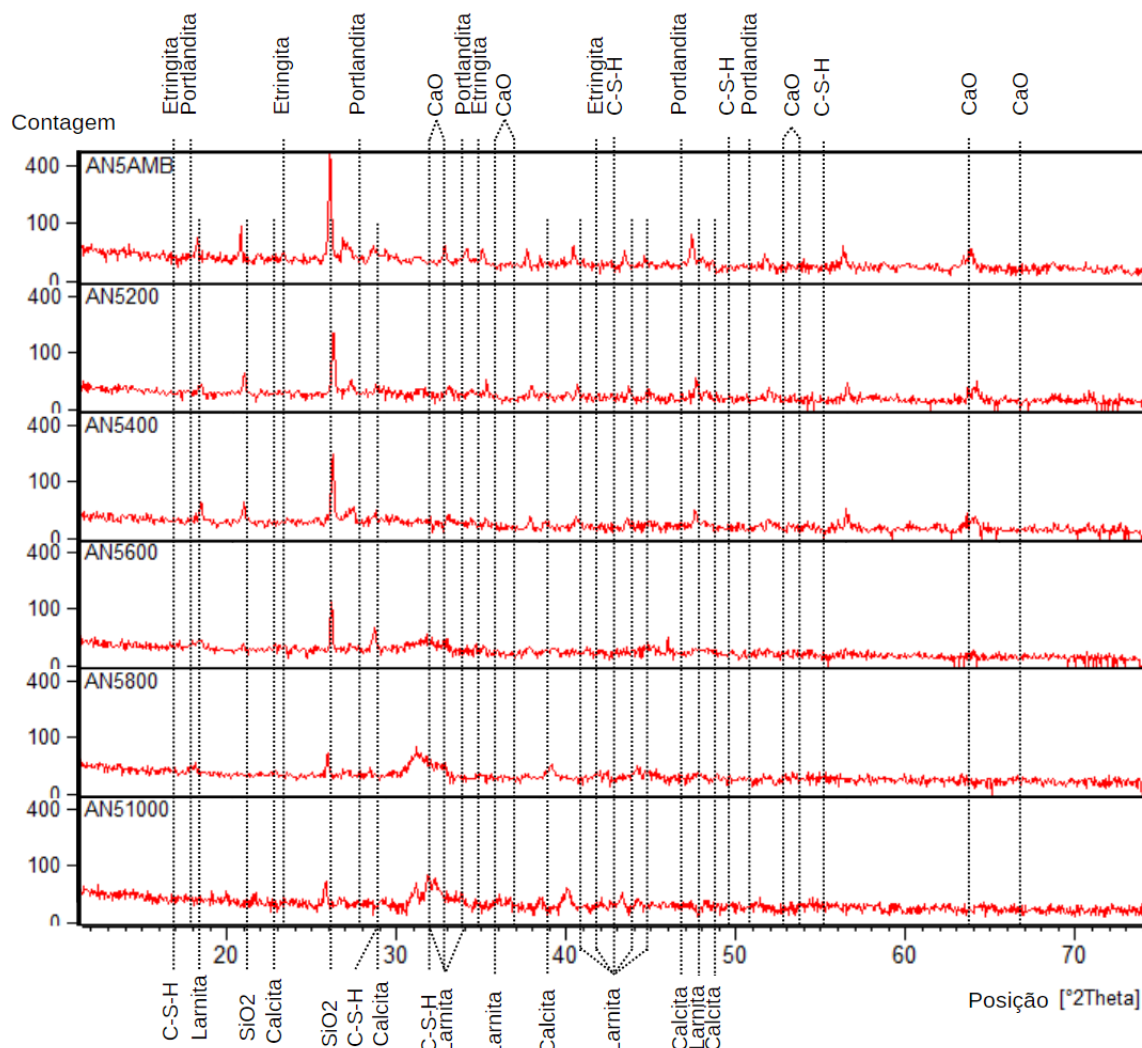


Figura 56: Difratomogramas do CA NP 1:5 em função da temperatura

(fonte: elaborado pelo autor)

O Silicato tricálcico (Ca_3SiO_5) é conhecido na forma polimórfica monoclinica presente no cimento como C_3S (alita), a qual não é quimicamente pura, mas estabilizada com a presença de íons Al e Mg (NABER *et al.*, 2016). É o principal componente do cimento Portland comum, e nos difratogramas apresenta picos mais intensos para os ângulos $29,505^\circ$, $32,558^\circ$, $32,680^\circ$, $34,413^\circ$, $41,365^\circ$, $51,784^\circ$, sendo de difícil identificação, visto que seus picos se confundem com outros em uma faixa onde há diversas sobreposições.

Wang *et al.* (2014) identificaram picos de C_3S , embora menos intensos, até os $400^\circ C$, porém reconhecendo-os sobrepostos aos picos do C_2S . Lima (2005) também comenta a dificuldade de se identificar os picos da alita, visto que se encontram sobrepostos aos de belita. Heikal *et*

al. (2000) relacionaram a diminuição de intensidade do pico de C_3S aos 200°C com o incremento do pico de C-S-H.

Silicato bicálcico (Ca_2SiO_4), conhecido na forma presente no cimento como $\beta - C_2S$ (larnita, belita) com picos mais intensos para os ângulos 19,503°, 32,161°, 32,766°, 32,990°, 34,854°, 41,207°, 48,188°, é de difícil identificação, visto que seus picos mais intensos se encontram em uma faixa de concentração de sobreposições de picos. Pode haver um incremento de larnita quando o C-S-H gel desaparece após aquecimento (CASTELLOTE *et al.*, 2004). Entretanto, Alonso *et al.* (2004) cogitam a possibilidade dessa nova formação de C_2S não ser propriamente larnita, dadas as alterações constatadas no espectro. A larnita foi identificada em amostras expostas a todas as temperaturas. Confirmando o que afirmam Alonso *et al.* (2004), que a fase anídrica da larnita permanece inalterada durante aquecimento, pelo menos até a temperatura de 750°C investigada pelo autor.

O C-S-H (Silicato Hidratado de Cálcio) ($xCaO.ySiO_2.zH_2O$) começa a desidratar logo no início do aquecimento (HAGER, 2013). “O gel de C-S-H sofre um processo de desidratação, que se inicia em 100°C e termina próximo a 400°C” (CHANA E PRICE, 2003, *apud* LIMA, 2005). O processo de desidratação do C-S-H gel reduz seu volume, enquanto há uma expansão da pasta de cimento em torno dos 200°C, o que impacta no aumento da porosidade, fissuras e redução abrupta da resistência à compressão e penetração (CASTELLOTE *et al.*, 2004; HAGER, 2013; WANG, 2014). Entretanto, até os 400°C o C-S-H gel ainda é encontrado em boas condições. Já próximo aos 700 °C o “C-S-H se decompõe em $\beta - C_2S$ (belita), βCS (wollastonita) e água, acarretando na retração da pasta de cimento e em significativa redução da resistência.” (FERNANDES *et al.*, 2017).

Próximo aos 750-800°C todo o C-S-H converteu-se em outra forma de neossilicatos, baixa polimerização de sílica na qual não há compartilhamento de oxigênios entre os tetraedros, produzindo fase próxima à larnita, embora não tão cristalina (Alonso *et al.*, 2004). Segundo Castellote *et al.* (2004), o C-S-H não é recuperado após o resfriamento e há um aumento nos níveis de calcita e larnita no momento em que o C-S-H desaparece.

A etringita (trisulfoaluminato de cálcio hidratado) ($Ca_6Al_2(SO_4)_3(OH)_{12}.26H_2O$), após iniciado o aquecimento é a primeira a se decompor (HAGER, 2013). Identificada pelos ângulos 9,090°, 15,773°, 22,899°, 34,975° e 41,939°. Segundo Castellote *et al.* (2004),

decompõe-se completamente até os 90°C, liberando Ca^{2+} , o que contribuiria para a formação de portlandita e calcita. O autor também destaca que a etringita não se recupera após o resfriamento.

É perceptível a redução dos picos indicativos de Portlandita (hidróxido de cálcio) ($Ca(OH)_2$) a partir dos 400°C em seus ângulos (2θ) de 18,089°, 28,662°, 47,124° e 50,795°, enquanto em torno dos 34,089° não é fácil determinar sua ocorrência em função de ser uma região do difratograma com vasta sobreposição de picos de outros compostos. Conforme descrito por Wang *et al.* (2014), “a estrutura cristalina do hidróxido de cálcio mantém-se em boas condições após ser aquecida até 400°C”. Isso se dá em função da desidratação dos cristais de portlandita em temperaturas a partir de 420°C, o que gera retração e microfissuração (FERNANDES *et al.*, 2017). Essa desidratação, segundo Lima (2005), é responsável por uma abrupta perda de massa.

Castellote *et al.* (2004) relatam, utilizando método de Termogravimetria (TGA), que até os 100°C a intensidade dos picos de portlandita e calcita aumentam. O início da decomposição abrupta da portlandita, por sua vez, ocorre entre 530°C e 560°C, temperatura na qual ela decompõe-se formando óxido de cálcio (CaO) e água (H_2O).

Heikal *et al.* (2000) destacam que com o resfriamento do concreto e o contato com água, até mesmo da umidade atmosférica, o óxido de cálcio reidrata-se, essa reação causa uma expansão volumétrica de 97%, causa de fissuras. A recristalização da portlandita após o resfriamento também foi identificada por Alarcon-Ruiz *et al.* (2005), entretanto, essa portlandita não é tão estável termicamente como a original.

A Calcita (carbonato de cálcio) ($CaCO_3$), conforme Alonso *et al.* (2004) está presente e até pode ter sua intensidade aumentada até os 450°C, não sendo mais detectada para temperaturas de 750°C, valor identificado também por Alarcon-Ruiz *et al.* (2005). Sua decomposição produz óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2) (BAPAT, 2013). Segundo Castellote *et al.* (2004), o comportamento da calcita varia em função da concentração de Aluminato Tricálcico (C3A) ($3CaO \cdot Al_2O_3$) do cimento, e que para ambas as concentrações há aumento dos níveis de calcita e larnita quando do desaparecimento do C-S-H gel. O cálcio liberado, quando há disponibilidade de dióxido de carbono (CO_2), pode reagir para formar calcita novamente.

O óxido de cálcio (CaO) tem seu aparecimento como função da decomposição da portlandita, que é a principal reação responsável pela elevação da quantidade de óxido de cálcio observada em torno dos $550^{\circ}C$ segundo Hager (2013). Já para Wang *et al* (2014), aos $600^{\circ}C$ a calcita ($CaCO_3$) dissocia-se em óxido de cálcio e gás carbônico, enquanto Xing *et al.* (2011) indicou que essa reação ocorre aos $750^{\circ}C$. Heikal *et al.* (2000) associam a diminuição de $Ca(OH)_2$ entre $200^{\circ}C$ e $600^{\circ}C$ a sua parcial conversão em $CaCO_3$, assim como a decomposição de $CaCO_3$ em óxido de cálcio.

Entretanto Wang *et al* (2014) destacam que o pico de difração do óxido de cálcio não está bem definido, o que pode ser efeito das reações do composto com a umidade e o gás carbônico do ar, o que geraria novamente $Ca(OH)_2$ e $CaCO_3$. Sua concentração pode diminuir consideravelmente em contato com a umidade atmosférica durante o resfriamento, formando novamente portlandita, destacando que o fato de as amostras serem em pó implica fortemente na ocorrência da reação que consome o óxido de cálcio, ao ponto de ser indetectável nos ensaios (CASTELLOTE *et al.*, 2004). Segundo Xing *et al.* (2011), o CaO livre pode reagir com a umidade ambiente e se converter em portlandita ($Ca(OH)_2$), reação que corresponde a um aumento de volume de 200%, gerando fissuração e degradação do concreto, afetando sua resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Não há variações significativas de comportamento entre as famílias analisadas. Os picos observados ocupam as mesmas posições nos difratogramas, representando os mesmos compostos cristalinos. A intensidade dos picos para as mesmas temperaturas também apresenta variações pequenas, com exceção da sílica (SiO_2) que tem picos maiores para o CAA NP, o que pode estar associado aos acréscimos de areia fina.

Enquanto com o aumento de temperatura, observam-se as alterações já esperadas na composição do concreto para todos os difratogramas gerados representadas tanto pelo decréscimo na contagem de determinados materiais cristalinos como etringita, C-S-H e portlandita, como no acréscimo de óxido de cálcio.

Também é possível relacionar as variações ocorridas nos materiais com a variação observada na resistência média à compressão após aquecimento, Figura 47. O intervalo onde a resistência à compressão decresce mais rapidamente, entre $400^{\circ}C$ e $600^{\circ}C$ coincide com uma variação significativa da contagem de C-S-H nos difratogramas.

5.4 Correlação entre variáveis de resposta

Nesse item apresenta-se o grau de correlação entre as variáveis de resposta para todos os concretos produzidos na etapa principal em relação à resistência à compressão, ao módulo de elasticidade e à VPU, considerando os valores experimentais para todas as temperaturas de exposição, incluída a temperatura ambiente.

O coeficiente de regressão R^2 é uma medida de quão bem a equação de regressão múltipla se ajusta aos dados amostrais e indica a porcentagem da variabilidade total que é explicada pelo modelo de regressão (RIBEIRO; TEN CATEN, 2003). Valores de R^2 próximos de 1 indicam uma forte relação entre as variáveis analisadas e conseqüentemente alta confiabilidade das expressões teóricas propostas. À medida que o valor de R^2 se aproxima de 1 também se considera que maior porcentagem da variabilidade do fenômeno pode ser explicada pelo modelo de regressão utilizado.

5.4.1 Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade

A correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, para valores absolutos apresentados na Figura 57, apresentou melhor ajuste para o modelo de regressão quadrática, sendo o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,8703. O resultado indica que a função de regressão obtida tem uma boa capacidade de prever os resultados experimentais, indicando uma forte relação direta entre resistência à compressão e o módulo de elasticidade, e que os mecanismos e fenômenos que levam à obtenção de resistências à compressão elevadas levam igualmente à obtenção de módulos de elasticidade elevados.

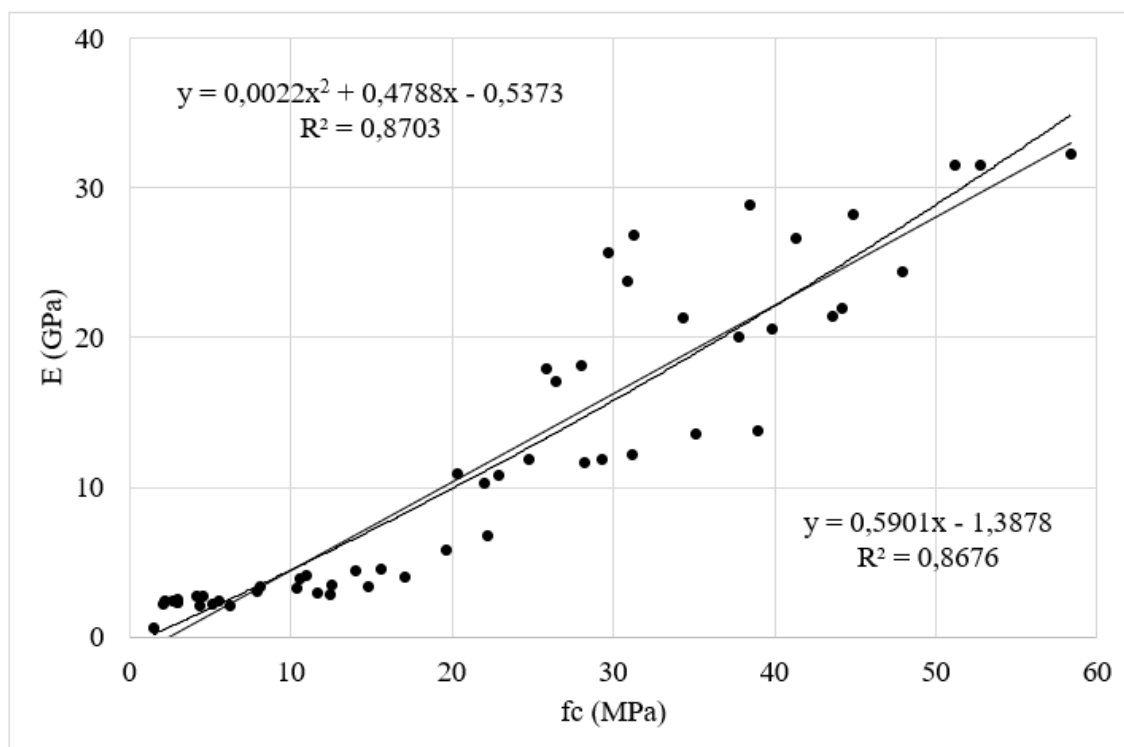


Figura 57: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade

(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando-se a análise de regressão dos fatores de redução apresentada na Figura 58, observa-se uma melhora considerável da correlação, associada ao R^2 igual a 0,9804, para o modelo de regressão exponencial.

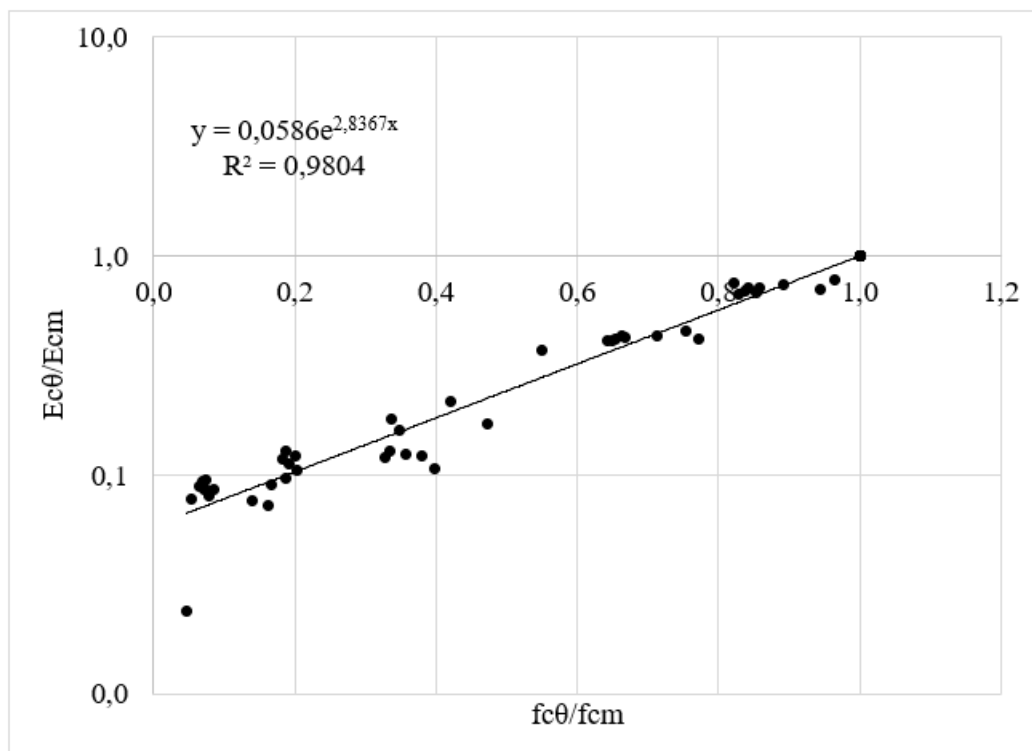


Figura 58: Correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade normalizados

(fonte: elaborado pelo autor)

Esses resultados vão ao encontro dos resultados obtidos por Almeida (2017), que obteve coeficientes de determinação de 0,90.

5.4.2 Correlação entre VPU e resistência à compressão

A correlação entre a VPU e a resistência à compressão, para valores absolutos apresentados na Figura 59, obteve ajustes equivalentes para os modelos de regressão quadrática e linear, ambos alcançando R^2 igual a 0,9009.

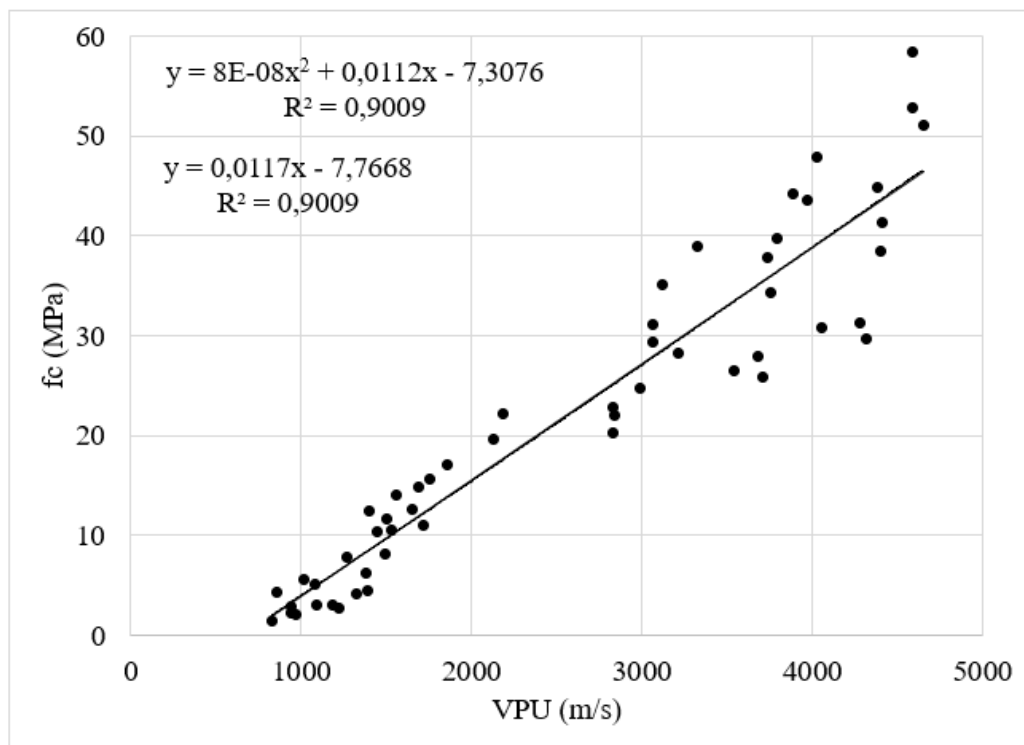


Figura 59: Correlação entre a VPU e a resistência à compressão

(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando-se a análise de regressão dos fatores de redução apresentada na Figura 60, observa-se uma melhora considerável da correlação, associada ao R^2 igual a 0,9648, para o modelo de regressão quadrático que apresentou melhor ajuste dos dados. O modelo de regressão linear apresentou fator de correlação igual a 0,9621, muito próximo ao fator do modelo quadrático.

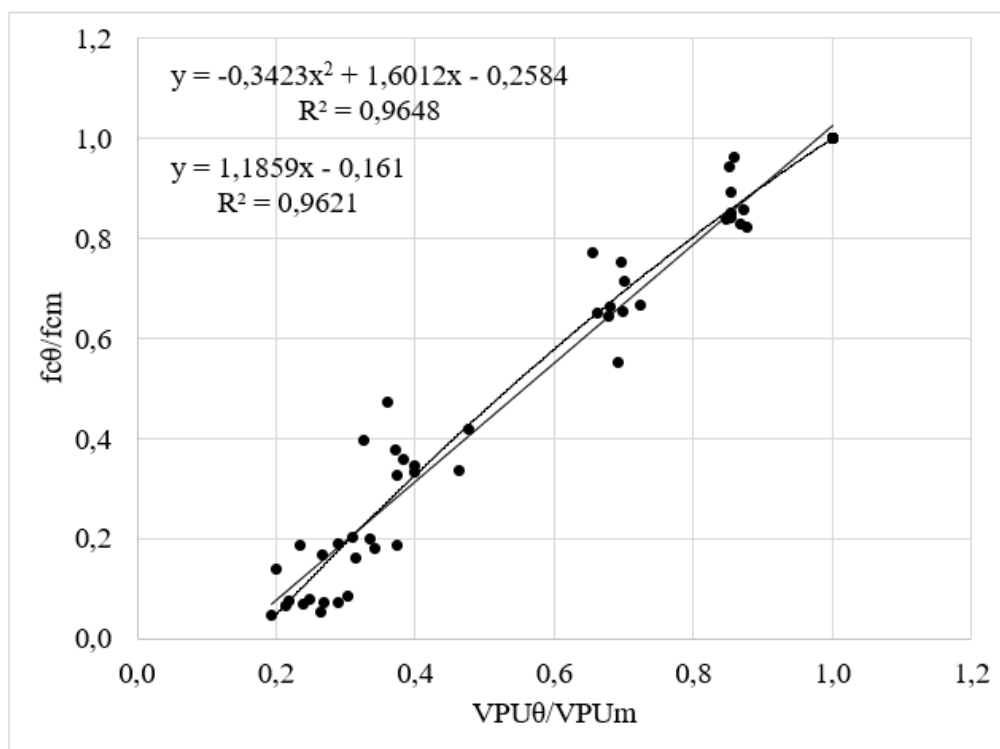


Figura 60: Correlação entre a VPU e a resistência à compressão normalizadas

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados confirmam a forte correlação entre a VPU e a resistência à compressão estando de acordo com o observado por Almeida (2017), que obteve coeficiente de correlação de 0,9469 para o modelo de regressão linear.

5.4.3 Correlação entre VPU e módulo de elasticidade

Na Figura 61 é apresentada a correlação entre a VPU e o módulo de elasticidade, para valores absolutos. O melhor ajuste foi obtido com modelo de regressão quadrática, sendo o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,9946. O modelo de regressão exponencial utilizado para a linearização da curva também apresentou coeficiente de determinação bastante elevado, R^2 igual a 0,9803.

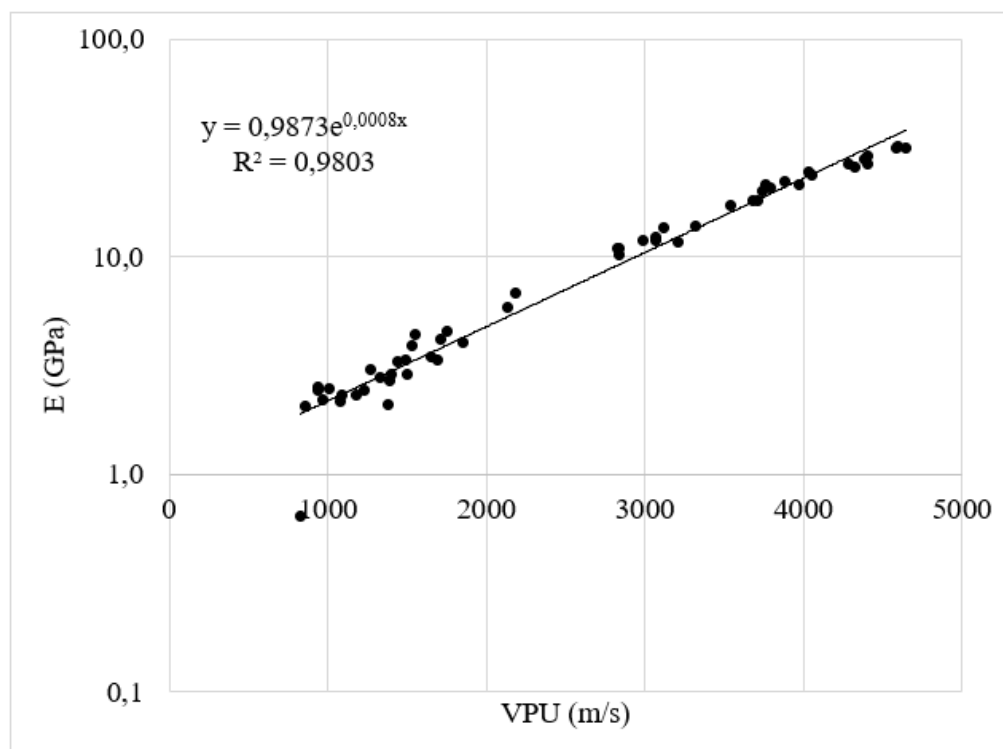


Figura 61: Correlação entre a VPU e o módulo de elasticidade

(fonte: elaborado pelo autor)

Considerando-se a análise de regressão dos fatores de redução apresentada na Figura 62, observa-se que o modelo de regressão exponencial apresentou um forte grau de correlação, R^2 igual a 0,9837.

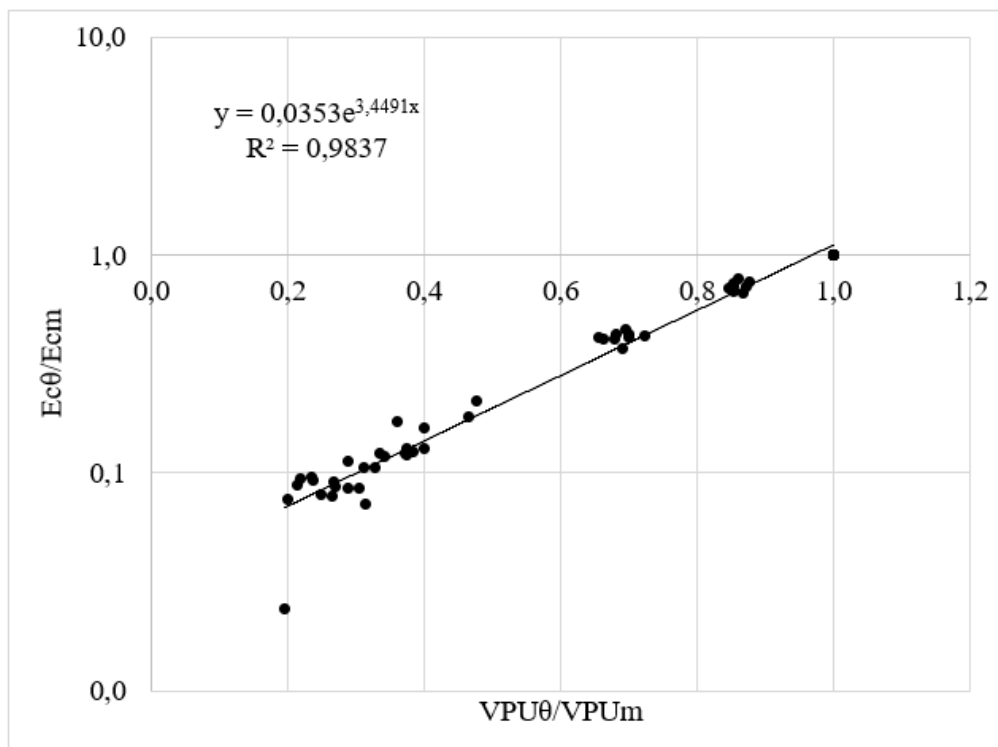


Figura 62: Correlação entre a VPU e o módulo de elasticidade normalizados

(fonte: elaborado pelo autor)

Os resultados mostram uma correlação entre VPU e módulo de elasticidade mais forte do que aquela observada entre a VPU e a resistência à compressão.

5.5 Análise Qualitativa

5.5.1 Avaliação visual de cor e fissuras

Ao longo do programa observou-se a variação de cor e fissuração dos concretos após aquecimento, desta forma esses resultados são complementares ao escopo inicial do programa de pesquisa. Os padrões de fissuras para os concretos CC 1:5 e 1:3,5 não são apresentados, pois foram os primeiros traços produzidos, não havendo ainda atenção a esse aspecto, que teve sua observação iniciada durante os ensaios do CC 1:6,5.

O aquecimento do concreto provoca alterações químicas nos compostos que provocam mudanças na cor do concreto. Essa alteração é considerada “um indicador amplamente reconhecido da extensão dos danos causados pelo fogo” (IAEA, 2002), embora a sua utilização deva ser realizada com cautela, pois depende de vários fatores como a composição das misturas.

O aquecimento do concreto a altas temperaturas provoca rachaduras e altera sua coloração da normal para rosa ou vermelho (300-600°C), cinza esbranquiçado (600-900°C), e amarelo-claro ou bege (900-1000°C) (SHORT *et al.*, 2001; ANNEREL *et al.*, 2007; FELICETTI, 2011). Contudo, as manifestações observadas classificam-se como fissuras mais do que propriamente rachaduras. A variação de cor apresentada na Figura 63 é representativa de todos os traços produzidos, na sequência: ambiente, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C e 1000°C.



Figura 63: Variação de cores do concreto

(fonte: elaborado pelo autor)

Segundo Short *et al.* (2001), a descoloração rosa-avermelhada decorre da presença de compostos ferrosos no agregado miúdo ou graúdo, que desidratam ou oxidam nesta faixa de temperatura. Felicetti (2004) destaca que a intensidade da mudança de cor depende do tipo de agregado e é mais pronunciada para agregados siliciosos e menos para agregados calcários e ígneos.

As indicações de fissuração são mostradas nas Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70. As figuras mostram corpos de prova submetidos a 600°C, 800°C e 1000°C respectivamente. Diferentes padrões de fissuração são observados, alguns traços apresentaram mais fissuras para a temperatura menor, outros para a maior; comparando-se os traços também há variações, não sendo possível observar um padrão.



Figura 64: Fissuras CC 1:6,5

(fonte: elaborado pelo autor)



Figura 65: Fissuras CAA VMA 1:3,5

(fonte: elaborado pelo autor)



Figura 66: Fissuras CAA VMA 1:5

(fonte: elaborado pelo autor)



Figura 67: Fissuras CAA VMA 1:6,5

(fonte: elaborado pelo autor)



Figura 68: Fissuras CAA NP 1:3,5

(fonte: elaborado pelo autor)



Figura 69: Fissuras CAA NP 1:5

(fonte: elaborado pelo autor)



Figura 70: Fissuras CAA NP 1:6,5

(fonte: elaborado pelo autor)

Ainda conforme Short *et al.* (2001), a alteração de cor para rosa avermelhado é importante pois coincide com uma significativa perda de resistência à compressão do concreto para a faixa de temperatura correspondente. Considera-se essa afirmação coerente, pois considerando-se os 600°C, os resultados da pesquisa apontam para perdas de resistência maiores do que 50%, ver Tabela 44. Tendo em vista não apenas a observação das faces expostas dos concretos após incêndios, recomenda-se o corte para inspeção, a fim de observar a profundidade do concreto afetada (SHORT *et al.*, 2001).

5.5.2 Avaliação visual de *spalling*

Não houve registros de *spalling* nos corpos de prova sazoados e submetidos às altas temperaturas. Todos eles, sem exceção, foram retirados sem que houvesse rachaduras, saliências, fragmentação ou desintegração, embora possam apresentar pequenas fissuras externas. Já em relação à possível desintegração, tomou-se extremo cuidado em relação a impactos em corpos de prova submetidos a 800°C e 1000°C, visto que até mesmo o atrito com as superfícies causou pequenos danos às arestas mais vivas de alguns corpos de prova.

Embora durante a pesquisa tenha sido tomado o cuidado de evitar o *spalling* com o objetivo de preservar os corpos de prova, a fim de que fosse possível submetê-los aos diversos ensaios já amplamente comentados, decidiu-se submeter corpos de prova que permaneceram todo o

tempo em câmara úmida a altas temperaturas. Os objetivos dessa exposição são três de mesmo grau de importância: primeiro, verificar se o fenômeno ocorreria; segundo, observar com que intensidade se manifestaria; terceiro, identificar qual a temperatura registrada pelo forno no momento do *spalling*.

Levando-se em consideração o compilado de diferentes taxas de aquecimento aplicadas por diversos autores e ocorrência ou não de *spalling* apresentado na Tabela 3, informações adicionais de que segundo Person (2004), corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro produzidos com concreto autoadensável não sofreram *spalling* quando aquecidos com taxas de 4°C/min, mas sofreram quando aquecidos com taxas de 8°C/min, optou-se pela utilização de taxas de aquecimento de 9°C/min.

Os corpos de prova foram transferidos da câmara úmida diretamente para o forno, as unidades exibidas na Figura 71 são representativas dos traços: CC 1:3,5; CC1:5; CC1:6,5 e CAA VMA 1:3,5; CAA VMA 1:5; CAA VMA 1:6,5. Diferentemente dos aquecimentos dos espécimes sazoados, esperando-se que ocorresse o *spalling* e buscando preservar a integridade mecânica do forno, visto que este foi um equipamento crítico dentro da pesquisa, inseriu-se uma gaiola de proteção, a qual sofreu avarias no primeiro aquecimento e precisou ser restaurada.



Figura 71: Corpos de prova não sazoados (CC e CAA VMA)

(fonte: elaborado pelo autor)

Após iniciado o aquecimento com taxa de aquecimento de $9^{\circ}\text{C}/\text{min}$, acompanhou-se a evolução das temperaturas no *display* do forno enquanto buscou-se identificar a ocorrência do fenômeno auditivamente. Os estampidos foram detectados em torno de 630°C a 650°C , o resultado após abertura do forno pode ser visto na Figura 72.



Figura 72: Corpos de prova após aquecimento/*spalling* (CC e CAA VMA)

(fonte: elaborado pelo autor)

Dois corpos de prova não apresentaram qualquer indício de *spalling*, foram eles o CC 1:6,5 e o CAA VMA 1:5. Pode-se dizer que na sequência o menos afetado foi o CC 1:5, seguido pelo CC 1:3,5, CAA VMA 1:6,5 e o mais afetado o CAA VMA 1:3,5. Uma possível explicação para a configuração geral vislumbrada seria a maior incidência de calor nos CPs das extremidades, o que preservaria os CPs centrais (CC 1:5 e CAA VMA 1:5), enquanto a maior porosidade do CC 1:6,5 preservou-o da degradação.

Novamente corpos de prova foram transferidos da câmara úmida diretamente para o forno, as unidades exibidas na Figura 73 são representativas dos traços: CAA NP 1:3,5; CAA NP 1:5; CAA NP 1:6,5.



Figura 73: Corpos de prova não sazonados (CAA NP)

(fonte: elaborado pelo autor)

Após iniciado o aquecimento, acompanhou-se a evolução das temperaturas no *display* do forno enquanto buscou-se identificar a ocorrência do fenômeno auditivamente. Os estampidos foram detectados novamente em torno de 630°C a 650°C, o resultado após abrir o forno pode ser visto na Figura 74.



Figura 74: Corpos de prova após aquecimento/spalling (CAA NP)

(fonte: elaborado pelo autor)

Todos os corpos de prova sofreram *spalling*, o mais danificado foi o CAA NP 1:6,5 do qual não sobrou parte cilíndrica que o identificasse. Os CAA NP 1:3,5 e CAA NP 1:5 ainda podem ser identificados entre os destroços. Novamente o exemplar 1:5 poderia ser considerado o mais protegido em relação aos resistores, embora não haja justificativa aparente para a desintegração total do exemplar 1:6,5 não acompanhada pela desintegração do exemplar 1:3,5.

Feitas as ressalvas, principalmente pelo fato de se ter submetido apenas um corpo de prova de cada traço, e comparando-se apenas as imagens de todos os corpos de prova após ocorrência de *spalling*, é coerente afirmar que os corpos de prova que mantiveram uma maior porcentagem volumétrica dos três cilindros de concreto íntegro são os do concreto convencional, seguidos pelo concreto autoadensável com VMA e por último o concreto autoadensável com finos não pozolânicos. O que é equivalente a dizer que os que mais sofreram *spalling* foram os CAA NP, seguidos pelos CAA VMA e por último os CC.

Novamente evidenciando as conclusões de Zhu e Bartos (2003): o CAA no qual utilizou-se VMA, e nenhuma adição de finos, apresentou maior permeabilidade, absorvidade capilar de água e difusividade de cloreto do que o CAA com adição de finos e do que no concreto

convencional. O que pode explicar o comportamento em relação ao *spalling* dos concretos estudados.

Person (2004) identificou a temperatura na qual as explosões ocorrem como a temperatura crítica de 374°C, também observou *spalling* explosivo em pilares de concreto autoadensável, e não em pilares de concreto convencional, embora tenham sido igualmente curadas. Boström (2003) relatou que o *spalling* é maior nos concretos autoadensáveis do que no concreto comum quando eles apresentam a mesma relação água/cimento. Aslani e Samali (2013) comentam que embora sejam poucos os estudos em relação ao concreto autoadensável, eles mostram uma tendência de maior risco de *spalling* em relação ao concreto convencional ou mesmo um comportamento semelhante.

Jansson e Boström (2013) comentam que embora tenhamos uma compreensão dos diversos fatores envolvidos, ainda há falta de compreensão da física fundamental do *spalling*, o que faz com que seja difícil determinar qual a contribuição dos diferentes fatores, permanecendo inexata nossa capacidade de previsão do *spalling*. Essa realidade implica ainda na necessidade de ensaios ao fogo, visto que são a maneira mais precisa de investigação de resistência ao fogo de elementos específicos, incluindo a possibilidade de ocorrência de *spalling*. Adicionalmente a combinação de modelagem e teste é indicada para que se desenvolva a compreensão fundamental do fenômeno.

Entende-se que a quantidade de exemplares expostos nesta etapa não permite grandes elucidações. Entretanto, sendo esta etapa realizada como etapa adicional às propostas iniciais desta pesquisa, comprova-se que as decisões adotadas em relação ao sazonalamento foram eficientes, visto que garantiram a integridade dos corpos de prova, possibilitando a realização de todos os ensaios posteriores à etapa de aquecimento.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste item são apresentadas as conclusões da pesquisa, elaboradas com base nas análises dos resultados experimentais, e válidas para os traços e ensaios realizados neste trabalho. Complementarmente apresentam-se sugestões para trabalhos futuros, as quais permitam a que se dê continuidade à linha de pesquisa, de maneira a contribuir com o avanço do conhecimento do comportamento dos CAA expostos a altas temperaturas.

6.1 Conclusões

O programa experimental desta dissertação de mestrado buscou identificar a lacuna de conhecimento existente sobre as características físicas e propriedades mecânicas residuais de duas famílias de CAA expostos a altas temperaturas, utilizando-se para isso de um CC como referência.

Ao expor os CAA a diferentes temperaturas, confirmou-se que, assim como ocorre com os CC, seu comportamento exige cuidado, pois suas propriedades macroestruturais e características microestruturais são consideravelmente afetadas com o aumento térmico.

Observou-se para os CAA, assim como para o CC, que a deterioração térmica das propriedades mecânicas, resistência à compressão e módulo de elasticidade, é mais intensa para o intervalo entre os 400°C e os 600°C. Considerando-se esta a faixa de temperatura crítica.

Concluiu-se que as três famílias de concretos sofrem reduções significativas em suas resistências à compressão com o aumento das temperaturas. Reforça-se que os fatores de redução determinados variam entre eles e, quando comparados com os da NBR 15200 (ABNT, 2012), a única família a apresentar fatores de redução a favor da segurança para temperaturas até 600°C foi CAA NP.

Em relação ao módulo de elasticidade, concluiu-se que a redução desta propriedade ocorre mais intensamente do que a redução da resistência à compressão. Comportamento já descrito pela NBR 15200 (ABNT, 2004), embora a referida norma apresente valores residuais para a propriedade maiores do que os observados na pesquisa para temperaturas de até 600°C.

Estando os valores observados ainda mais divergentes dos normatizados do que os de resistência. Adicionalmente, a análise das taxas de variação em função das faixas de temperatura permite concluir que o módulo de elasticidade se reduz mais intensamente em temperaturas mais baixas, o que está em desacordo com o que a norma substituída previa.

Relacionando-se os resultados obtidos na pesquisa de ambas as propriedades mecânicas, resistência à compressão e módulo de elasticidade, conclui-se que os fatores de redução indicados pela NBR 15200 (ABNT, 2004; ABNT, 2012) parecem inadequados. Para a resistência à compressão raras exceções apresentam resistência residual maior do que a indicada pela referida norma até os 600°C, temperatura na qual preserva-se menos do que 45% da propriedade. Enquanto para o módulo de elasticidade, os valores obtidos são consideravelmente menores do que os normatizados até os 600°C, comportamento que se inverte após os 800°C, temperatura na qual o módulo poderia ser considerado irrelevante.

Resultados como estes destacam a importância da revisão da normatização vigente, de forma que sejam indicados fatores de redução da resistência à compressão para diferentes concretos, produzidos com materiais nacionais, e reinseridos fatores de redução do módulo de elasticidade que acompanhem a diversidade dos primeiros.

Concluiu-se que a velocidade residual obtida com o ensaio de VPU evolui na mesma intensidade que a resistência mecânica residual até a temperatura de 600°C. O que indica ser um ensaio bastante preciso para realizar correlações entre as propriedades.

Concluiu-se que, no tocante ao estudo das propriedades residuais, a etapa de sazonalidade adotada garantiu a preservação dos corpos de prova durante e após os aquecimentos, permitindo que fossem realizados os ensaios inicialmente previstos.

Por fim concluiu-se que, desde que tomadas precauções para impedir a ocorrência de *spalling*, o comportamento dos concretos autoadensáveis foi semelhante ao comportamento do concreto convencional de referência. Destaca-se que investigações mais amplas sobre o comportamento do CAA, principalmente relacionadas a ocorrência de *spalling*, são necessárias.

Existe a necessidade de novas pesquisas que busquem identificar a influência de diferentes parâmetros sejam eles variações nos materiais constituintes do concreto, variações de

propriedades do concreto, diferentes taxas de aquecimento e exposição a mais temperaturas. A compreensão mais profunda do comportamento desses concretos sob diferentes níveis de exposição à degradação térmica permitirá desenvolver concretos e técnicas que tenham um melhor desempenho frente às altas temperaturas. Desta forma, são feitas sugestões para trabalhos futuros no item 6.2.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Investigar o impacto que a utilização de diferentes agregados, como brita granítica, brita calcárea e materiais reciclados teriam sobre os concretos autoadensáveis expostos a temperaturas elevadas.

Aprofundar a investigação de diferentes finos pozzolânicos como sílica ativa, cinza volante, escória de alto forno, metacaulim e cinza de casca de arroz, e também não pozzolânicos como *filler* calcáreo, pó de brita e cerâmica moída. Pode-se investigar também a variação de seus teores de substituição.

Produzir concretos com teores de argamassa diversos, nos concretos autoadensáveis a tendência é de que esses teores sejam maiores que no concreto convencional, embora novos métodos de dosagem possam equipará-los.

Avaliar os traços já determinados de concretos autoadensáveis, variando-se o teor dos aditivos e, conseqüentemente, da relação água/cimento. Essa variação gerará resultados ainda mais amplos em relação a diversos níveis de resistência à compressão e porosidade da matriz cimentícia, possibilitando melhor compreensão do comportamento do material.

Variar as taxas de aquecimento. Expor os concretos a mais temperaturas, criando curvas com mais pontos, o que permite ser mais preciso em relação às temperaturas onde ocorrem os diferentes fenômenos.

Investigar o teor de umidade limite no qual não ocorreria *spalling*.

Após exposição a altas temperaturas, armazenar novamente os corpos de prova, desta vez em ambientes diferentes, câmara úmida e câmara seca. Ensaiar alguns imediatamente após a exposição, alguns uma semana após a exposição e alguns 28 dias após a exposição. Assim é

possível acompanhar os efeitos dos processos de reidratação sobre as características estudadas.

Estudar o efeito das fibras de polipropileno incorporadas ao concreto autoadensável e sua eficiência na redução do *spalling*, avaliando as características físicas e geométricas da fibra e seu teor ideal no concreto.

REFERÊNCIAS

ALARCON-RUIZ, Lucia et al. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 35, n. 3, p. 609-613, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.015>.

ALHASANAT, Mahmoud B. *et al.* Scanning Electron Microscopic Evaluation of Self-Compacting Concrete Spalling at Elevated Temperatures. **American Journal Of Engineering And Applied Sciences**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 119-127, 1 jan. 2016. Science Publications. <http://dx.doi.org/10.3844/ajeassp.2016.119.127>.

ALI, Manolia Abed Al-Wahab. Residual Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete Exposed to Elevated Temperatures. **Engineering And Technology Journal**, [s. l.], v. 29, p. 1386-1390, 2011.

AL-KADI, Qahir N. S. *et al.* Coconut Fibre Effect on Fresh and Thermo Gravimetric Properties to Mitigate Spalling of Self-Compacting Concrete at Elevated Temperatures. **Open Journal of Civil Engineering**, [S.L.], v. 05, n. 03, p. 328-338, 2015. Scientific Research Publishing, Inc.. <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2015.53033>.

AL-KADI, Qahir *et al.* Spalling Assessment of Self-Compacting Concrete with and Without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures. **Journal Of Engineering Research And Application**, [s. l.], v. 6, n. 6, p. 82-93, 2016.

Al-Lami, M. S., Effect of Elevated Temperature on Compressive Strength of Self Compacting Concrete Using Viscocrete and Silica Fume, **International Journal of Civil Engineering and Technology**, 8(10), 2017, pp. 405–413 <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=10>.

ALMEIDA, Jacinto Manoel Antunes de. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. 340 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ALSUBARI, Belal *et al.* Palm Oil Fuel Ash as a Partial Cement Replacement for Producing Durable Self-consolidating High-Strength Concrete. **Arabian Journal For Science And Engineering**, [S.L.], v. 39, n. 12, p. 8507-8516, 30 out. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13369-014-1381-3>.

ANAGNOSTOPOULOS, N. *et al.* Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 42, n. 10, p. 1393-1405, 24 dez. 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-008-9459-6>.

ANAND, N. *et al.* Effect of Grade of Concrete on the Performance of Self-Compacting Concrete Beams Subjected to Elevated Temperatures. **Fire Technology**, [S.L.], v. 50, n. 5, p.

1269-1284, 15 maio 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-013-0345-6>.

ANAND, N. *et al.* Influence of mineral admixtures on mechanical properties of self-compacting concrete under elevated temperature. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 40, n. 7, p. 940-958, 6 out. 2016. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2353>.

ANAND, N. *et al.* Stress-Strain Behaviour of Normal Compacting and Self Compacting Concrete Under Elevated Temperatures. **Journal Of Structural Fire Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 63-76, 1 mar. 2014. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1260/2040-2317.5.1.63>.

ANNEREL, E. *et al.* Assessment of Temperature Increase and Residual Strength of SCC after Fire Exposure. 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 2007, pp. 715–20, doi:1854/11477.

ANNEREL, E.; TAERWE, L. Evolution of the strains of traditional and self-compacting concrete during and after fire. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 1369-1380, 23 dez. 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-010-9703-8>.

ANNEREL, E.; TAERWE, L. Strain model for traditional and self-compacting concrete during fire. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 217-229, 26 mar. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2126>.

ASLANI, F.; SAMALI, B.. Constitutive relationships for self-compacting concrete at elevated temperatures. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 48, n. 1-2, p. 337-356, 18 out. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0187-1>.

ASLANI, Farhad *et al.* Fire Performance of Heavyweight Self-Compacting Concrete and Heavyweight High Strength Concrete. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 5, p. 822, 11 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/ma12050822>.

ASLANI, Farhad; KELIN, Jack. Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 200, p. 1009-1025, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.323>.

ASLANI, Farhad; MA, Guowei. Normal and High-Strength Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Perlite, Scoria, and Polystyrene Aggregates at Elevated Temperatures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. 30(20), out.2018. ASCE.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15200**: Projeto de estruturas de concreto em situação de Incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017a.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

_____. **NBR 16886**: Concreto — Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2020a.

_____. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020b.

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

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

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

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação: ABNT, 2009a.

_____. **NBR 8522**: Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

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

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

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

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

AZARIJAFARI, Hessam *et al.* Ternary blended cement: an eco-friendly alternative to improve resistivity of high-performance self-consolidating concrete against elevated temperature. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 223, p. 575-586, jun. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.054>.

BAKHTIYARI, S. et al. Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures – Mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. **Thermochimica Acta**, [S.L.], v. 514, n. 1-2, p. 74-81, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2010.12.007>.

BAMONTE, Patrick; GAMBAROVA, Pietro G. A study on the mechanical properties of self-compacting concrete at high temperature and after cooling. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 45, n. 9, p. 1375-1387, 16 fev. 2012.

BAPAT, Jayant D.. **Mineral Admixtures in Cement and Concrete**: global summit 2017. Boca Raton: Crc Press, 2013. 309 p.

BIAZETTO, Bruno Ricardo. **Análise experimental da porosidade e das propriedades mecânicas do concreto submetido à fadiga térmica**. 2018. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BIDINOTTO, Gabrielle Bacelo. **Análise experimental de capacidade de carga residual e spalling em pilaretes de concreto armado com concretos de diferentes classes de resistência em situação de incêndio**. 2018. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BOSTRÖM, L.; JANSSON, R.. Fire spalling of self-compacting concrete. **5Th International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete**, Ghent, p. 741-745, 2007.

BOSTRÖM, Lars *et al.* Effect of specimen size and loading conditions on spalling of concrete. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 173-186, 2007. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.931>.

BOSTRÖM, Lars; LARSEN, Claus K.. Concrete for Tunnel Linings Exposed to Severe Fire Exposure. **Fire Technology**, [S.L.], v. 42, n. 4, p. 351-362, 30 ago. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-006-0006-0>.

CAETANO, Luciane Fonseca. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e Engenharia de Materiais**: uma introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 817 p.

CASTELLOTE, Marta *et al.* Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 34, n. 9, p. 1633-1644, set. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(03\)00229-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(03)00229-1).

CHANA, P; PRICE, B. The Cardington fire test. **Concrete**. London, p. 28-33, jan. 2003.

CHANDRA, S; BERNTSSON, L; ANDERBERG, Y. Some effects of polymer addition on the fire resistance of concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 10, n. 3, p. 367-375, maio 1980.

CHUNG, Chul Hun *et al.* Temperature distribution within polypropylene fiber-mixed reinforced concrete slabs exposed to an ISO 834 standard fire. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 20, n. 5, p. 1878-1886, 10 set. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12205-015-0473-2>.

CIMENTO NACIONAL (Brasil). **MAX PERFORMANCE CP V-ARI. 2018.** Disponível em: https://www.cimentonacional.com.br/public/documentos/fispq_sete_lagoas.pdf. Acesso em: 08 mar. 2022.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1994-1-2:** Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Bruxelas, 2005.

CONNOLLY, Raymond John. **The Spalling of Concrete in Fires.** 1995. 294 f. Tese (Doutorado) - Curso de Civil Engineering, Aston University, Birmingham, 1995.

COSTA, Carla Neves et al. **Aspectos tecnológicos dos materiais de concreto em altas temperaturas.** Nutau 2002 – Sustentabilidade, Arquitetura, Desenho Urbano, São Paulo, 2002.

DEHN, F. *et al.* Fire Spalling behaviour of self-compacting concrete (SCC) for tunnel construction - Taking the Malmö Citytunnel as an example. **5Th International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete**, Ghent, v. 5, p. 1027-1034, 2007.

DING, Yining *et al.* Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 113, p. 456-469, jun. 2016. Elsevier BV.

DING, Yining *et al.* Pore pressure of high-strength concrete and self-consolidating concrete at high temperature - a review. **Third International Symposium On Design, Performance And Use Of Self-Consolidating Concrete**, Xiamen, p. 297-307, 2014.

DING, Yining *et al.* Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature. **Construction And Building Materials**, La, v. 1, n. 6, p. 21-31, jul. 2011.

DMAE (Porto Alegre). Relatórios Mensais (Decreto 5.440/95). 2021. Elaborado por Gerência de Tratamento de Água. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dmae/usu_doc/quali2021_novembro.pdf. Acesso em: 08 mar. 2022.

DOMONE, P.L.. Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 197-208, fev. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003>.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete.** In: *EFNARC*. Fevereiro, 2002.

FARES, Hanaa *et al.* High temperature behaviour of self-consolidating concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 40, n. 3, p. 488-496, mar. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.006>.

FARES, Hanaa *et al.* Lightweight Self-Consolidating Concrete Exposed to Elevated Temperatures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 27, n. 12, dez. 2015.

FARES, Hanaa *et al.* Microstructure et propriétés physico-chimiques de bétons autoplaçants chauffés de 20 à 600°C. **European Journal Of Environmental And Civil Engineering**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 869-888, jan. 2011. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2011.9695278>.

FARES, Hanaa *et al.* Self-consolidating concrete subjected to high temperature. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 39, n. 12, p. 1230-1238, dez. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.001>.

FARES, Hanaa. **Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplaçants exposés à une température élevée**. 2009. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, École Doctorale Sciences Ey Ingénierie, Université de Cergy-Pontoise, Cergy-Pontoise, 2009.

FELICETTI, Roberto. Digital Camera Colorimetry for the Assessment of Fire Damaged Concrete. In: FIB TASK GROUP, 43., 2004, Milão. **Conference Paper**. Milão: Fib, 2004.

FERNANDES, B. *et al.* Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 838-863, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952017000400004>.

FERREIRA, Matheus Wanglon. **Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas**. 2019. 238 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FIB. Fire design of concrete structures - **Materials, structures and modelling**. State-of-art report, Bulletin 38 :106 pages, 2007.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES INC (Estados Unidos). **ADVA® 458 UHPC**. 2021. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/adva-high-range-water-reducers/adva-458-uhpc>. Acesso em: 15 nov. 2021a.

_____. **V-MAR 3**: aditivo modificador de viscosidade. Aditivo modificador de viscosidade. 2021. Disponível em: <https://gcpat.com.br/pt-br/solutions/products/v-mar-admixtures/v-mar-3>. Acesso em: 15 nov. 2021b.

GULER, Soner *et al.* Effect of macro polypropylene, polyamide and steel fibers on the residual properties of SCC at ambient and elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 289, p. 123154, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123154>.

HADDAD, Rami H. *et al.* Thermal performance of self-compacting concrete: destructive and nondestructive evaluation. **Canadian Journal Of Civil Engineering**, [S.L.], v. 40, n. 12, p. 1205-1214, dez. 2013. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/cjce-2013-0037>.

HAGER, I.. Behaviour of cement concrete at high temperature. Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences: Technical Sciences, [S.L.], v. 61, n. 1, p. 145-154, 1 mar. 2013. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/bpasts-2013-0013>.

HALLIDAY, David et al. **Fundamentos de Física: gravitação, ondas e termodinâmica**. 9. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2012.

HEIKAL, Mohamed *et al.* Effect of temperature on the physico-mechanical and mineralogical properties of Homra pozzolanic cement pastes. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 1835-1839, nov. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(00\)00403-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(00)00403-8).

HELAL, M. A.; HEIZA, Kh. M.. Effect of Fire and High Temperature on the Properties of Self Compacted Concrete. **Cice 2010 - The 5Th International Conference On Frp Composites In Civil Engineering**, Pequim, p. 433-439, 2010.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.

HERTZ, K.D.. Limits of spalling of fire-exposed concrete. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 103-116, mar. 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **IAEA-TCS-17: Guidebook on Non-Destructive Testing of Concrete Structures**. Viena: 2002, 231 p. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/6347/guidebook-on-non-destructive-testing-of-concrete-structures>. Acesso em 12 mar. 2022.

JANI, Noraniza Mohammad *et al.* Experimental Investigation on the Effect of Varying Fiber Mix Proportion on the Mechanical and Thermal Performances of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete under Hydrocarbon Fire Condition. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 10, n. 13, p. 4586, 2 jul. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/app10134586>.

JANSSON, R.; BOSTRÖM, L.. Fire spalling: Theories and experiments. **5Th International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete**, Ghent, p. 735-740, 2007.

JANSSON, Robert; BOSTRÖM, Lars. Factors influencing fire spalling of self compacting concrete. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 46, n. 10, p. 1683-1694, 22 jan. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-0007-z>.

JANSSON, Robert; BOSTRÖM, Lars. The Influence of Pressure in the Pore System on Fire Spalling of Concrete. **Fire Technology**, [S.L.], v. 46, n. 1, p. 217-230, 25 mar. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-009-0093-9>.

JIN, Tao et al. High strength self-compacting concrete at elevated temperature. **5Th International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete**, Ghent, p. 1135-1144, 2007.

KAKAE, Norichika et al. Physical and Thermal Properties of Concrete Subjected to High Temperature. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, [S.L.], v. 15, n. 6, p. 190-212, 13 jun. 2017. Japan Concrete Institute. <http://dx.doi.org/10.3151/jact.15.190>.

KHALIQ, Wasim; KODUR, Venkatesh. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 11, p. 1112-1122, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.012>.

KIRCHHOF, Larissa Degliuomini et al. **Effect of Moisture Content on the Behavior of High Strength Concrete at High Temperatures**. *Matéria* (Rio de Janeiro), [S.L.], v. 25, n. 1, jan. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0898>.

KIRCHHOF, Larissa Degliuomini. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. 2010. 262 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

KIRCHHOF, Paulo André. **A Contribuição de Sedimentos Terrígenos dos Rios Jacuí e Guaíba para o Sistema Lagunar (Lagoa dos Patos) do RS**. 2015. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Ufrgs, Porto Alegre, 2015.

KODUR, V.K.R.; PHAN, L. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 42, n. 6-7, p. 482-488, set. 2007.

LI, Ye *et al.* Pore pressure build-up and explosive spalling in concrete at elevated temperature: a review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 284, p. 122818, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122818>.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de. **Investigação de Temperatura de Concretos em Temperaturas Elevadas**. 2005. 257 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Ufrgs, Porto Alegre, 2005.

LIU, X. *et al.* On the mechanism of polypropylene fibres in preventing fire spalling in self-compacting and high-performance cement paste. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 38, n. 4, p. 487-499, abr. 2008. Elsevier BV.

LOMONTE, Francesco; GAMBAROVA, Pietro G.. Corner spalling and tension stiffening in heat-damaged R/C members: a preliminary investigation. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 48, n. 11, p. 3657-3673, 5 out. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0429-x>.

LORENZI et al., 51º Congresso Brasileiro do Concreto, Monitoramento de estruturas de concreto através de ensaios de velocidade de propagação do pulso ultra-sônico. Curitiba: Ibracon, 2009. 13 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/283732717_Monitoramento_de_estruturas_de_concreto_atraves_de_ensaios_de_velocidade_de_propagacao_do_pulso_ultra-sonico. Acesso em: 20 jun. 2022.

LU, Hui *et al.* Fire behaviour of high strength self-consolidating concrete filled steel tubular stub columns. **Journal Of Constructional Steel Research**, [S.L.], v. 65, n. 10-11, p. 1995-2010, out. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.06.013>.

LURA, Pietro; TERRASI, Giovanni Pietro. Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 49, p. 36-42, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.02.001>.

MAHAPATRA, Chinmaya Kumar; BARAI, Sudhirkumar V.. Temperature impact on residual properties of self-compacting based hybrid fiber reinforced concrete with fly ash and colloidal nano silica. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 198, p. 120-132, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.155>.

MALHORTA, H.L. **Design of fire-resisting structures**. Surrey University Press, London, 1982.

MARQUES, Diego Bernardes. **Reforço de pilares de concreto armado expostos a altas temperaturas com a utilização de tecido de fibra de carbono**. 2018. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Ufrgs, Porto Alegre, 2018.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paula J. M.. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 2014.

MENDES, Alessandra *et al.* Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 345-350, 25 maio 2007. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-007-9247-8>.

MUJEDU, Kasali Adebayo *et al.* Microstructure and compressive strength of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash exposed to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 274, p. 122025, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122025>.

MUTHUSAMY, Sivaraja; KOLANDASAMY, Poongodi. Lightweight self-compacting concrete at high temperatures. **Journal Of The Croatian Association Of Civil Engineers**, [S.L.], v. 67, n. 4, p. 329-338, maio 2015. Croatian Association of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.14256/jce.1141.2014>.

NABER, C. *et al.* Synthesis of monocrystalline Ca₃SiO₅ using the optical floating zone method. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 85, p. 156-162, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.04.008>.

NACIONAL, Call Center Cimento. **Características físicas e químicas do cimento**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <alessandro.franchetto@ufrgs.br>. em: 08 mar. 2022.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do Concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NOUMOWÉ, A. *et al.* High-Strength Self-Compacting Concrete Exposed to Fire Test. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 754-758, dez. 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2006\)18:6\(754\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2006)18:6(754)).

NUNES, Jorge Luiz da Silva. **Análise experimental da influência da técnica de resfriamento, tipo e período de cura em elementos de concreto submetidos a altas temperaturas**. 2018. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

OHDAIRA, Etsuzo; MASUZAWA, Nobuyoshi. Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete — the possibility of NDE. **Ultrasonics**, [S.L.], v. 38, n. 1-8, p. 546-552, mar. 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0041-624x\(99\)00158-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0041-624x(99)00158-4).

OKAMURA, H; OUCHI, M. Self-Compacting Concrete. **Journal Of Advanced Concrete Technology**, Vol. 1, p. 5-15. abr. 2003.

OKAMURA, H; OUCHI, M. Self-compacting high performance concrete. **Progress In Structural Engineering And Materials**, Vol. 1, p. 378-383. jul. 1998.

OZAWA, K., SAKATA, N., OKAMURA, H., Evaluation of Self-Compactibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test, **Concrete Library of JSCE**, Vol. 25, p. 59-75. jun.1995.

PADILHA, Wagner Fernando Lavandoski. **Análise experimental do desempenho mecânico e de durabilidade de concreto estrutural com resíduos de polipropileno e cinza de casca de arroz sem controle de queima exposto a elevadas temperaturas**. 2019. 86 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

PATHAK, Neelam; SIDDIQUE, Rafat. Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 30, p. 274-280, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.010>.

PERIN, Paulo Iuri de Borba. **Influência da resistência à compressão no spalling explosivo em concretos de alta resistência em situação de incêndio**. 2019. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

PERSSON, B.. Fire resistance of self-compacting concrete, SCC. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 37, n. 9, p. 575-584, nov. 2004. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02483286>.

PISTOL, K. *et al.* High temperature behaviour of self-compacting concrete with limestone powder. **Rheology And Processing Of Construction Materials – 7Th Rilem International Conference On Self-Compacting Concrete And 1St Rilem International Conference On Rheology And Processing Of Construction Materials**, [s. l], p. 221-228, 2013.

QADI, Arabi N. S. Al *et al.* Effect of polypropylene fibers on thermogravimetric properties of self-compacting concrete at elevated temperatures. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 177-186, 15 fev. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2123>.

QADI, Arabi N.s. Al; AL-ZAIDYEEN, Sleiman M.. Effect of fibre content and specimen shape on residual strength of polypropylene fibre self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. *Journal Of King Saud University - Engineering Sciences*, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 33-39, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2012.12.002>.

QADI, Qaher Nawwaf Al; ALHASANAT, Mahmoud Bashir; QADI, Arabi Al. Spalling Assessment of Self-Compacting Concrete with and Without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures. **International Journal Of Engineering Research And Applications**, [s. l], v. 6, n. 6, p. 82-93, jun. 2016.

REINHARDT, Hans W; STEGMAIER, Michael. Self-Consolidating Concrete in Fire. **Acı Materials Journal**, Farmington Hill, v. 103, p. 130-135, 2006.

RIBEIRO, José Luis Duarte; TEN CATEN, Carla (ed.). **Projeto de Experimentos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. (Série Monográfica Qualidade). Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção.

Rilem Technical Committees 129-MHT. **Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures, part 1: introduction, Part 2: Stress–strain relation, part 3: compressive strength for service and accident conditions**, Mater Struct vol. 28 no. 181;1995. p. 410–4.

RÍOS, José D. *et al.* Behavior of High-Strength Polypropylene Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete Exposed to High Temperatures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 0-0, nov. 2018. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002491](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002491).

RUSCHEL, Fernanda. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre-RS**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SADRMOMTAZI, Ali *et al.* Residual strength and microstructure of fiber reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 230, p. 116969, jan. 2020. Elsevier BV.

SCHNEIDER, Ulrich. Concrete at High Temperatures: a general review. **Fire Safaty Journal**, Mönchebergstr, n. 13, p. 55-68, 1988.

SCREENING EAGLE TECHNOLOGIES. **Pundit Ultrasonic Instruments**: global summit 2017. Global Summit 2017. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=CJQ_d8bhmik. Acesso em: 12 nov. 2021.

SHORT, N.R et al. Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 9-15, fev. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618\(00\)00065-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0950-0618(00)00065-9).

SIDERIS, K.K.; MANITA, P.. Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 41, p. 296-302, abr. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.093>.

SIDERIS, Kosmas K.. Mechanical Characteristics of Self-Consolidating Concretes Exposed to Elevated Temperatures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 8, p. 648-654, ago. 2007. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2007\)19:8\(648\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2007)19:8(648)).

SIDERIS, Kosmas K.. Mechanical Characteristics of Self-Consolidating Concretes Exposed to Elevated Temperatures. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 19, n. 8, p. 648-654, ago. 2007.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. 1994. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SOUZA, Luiz Ailton de Araújo. **Comportamento do concreto frente à condição de altas temperaturas: análise das propriedades mecânicas residuais**. 2014. 168 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

STEGMAIER, Michael; REINHARDT, Hans-Wolf. Fire behaviour of plain Self – Compacting Concrete (SCC). **Otto Graf Journal**, v. 15, p. 33-42, 2004.

SU, Nan; HSU, Kung-Chung; CHAI, His-Wen. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 31, n. 12, p. 1799-1807, dez. 2001.

TAO, Jin *et al.* Compressive Strength of Self-Compacting Concrete during High-Temperature Exposure. **Journal Of Materials In Civil Engineering**, [S.L.], v. 22, n. 10, p. 1005-1011, out. 2010. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000102](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000102).

TAO, Jin *et al.* Thermal stress-strain of self-compacting concrete in compression. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 37, n. 3, p. 187-199, 20 fev. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2124>.

TAO, Jin *et al.* Transient strain of self-compacting concrete exposed to high temperature. **2Nd Int. Symposium On Design, Performance And Use Of Self Consolidating Concrete**, [s. l.], p. 628-638, 2009.

TAO, Jin *et al.* Transient strain of self-compacting concrete loaded in compression heated to 700 °C. **Materials And Structures**, [S.L.], v. 46, n. 1-2, p. 191-201, 11 jul. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-012-9894-2>.

TEIXEIRA, Wilson *et al.* (org.). **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 623 p.

TREZOS, Konstatinos G.; SFIKAS, Ioannis P.. Residual bond stress of self-compacting concrete specimens after high temperature treatment. **Rheology And Processing Of Construction Materials – 7Th Rilem International Conference On Self-Compacting Concrete And 1St Rilem International Conference On Rheology And Processing Of Construction Materials**, [s. l], p. 163-170, 2013.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para Dosagem de Concretos Auto-adensáveis**. 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Ufrgs, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto Autoadensável**. São Paulo: Leud, 2021.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Editora Pini Ltda, 2008. 1 v.

UYGUNOĞLU, Tayfun; TOPÇU, İlker Bekir. Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 23, n. 9, p. 3063-3069, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.04.004>.

UYSAL, Mucteba. Self-compacting concrete incorporating filler additives: performance at high temperatures. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 26, n. 1, p. 701-706, jan. 2012.

UYSAL, Mucteba; TANYILDIZI, Harun. Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 404-414, fev. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.028>.

WANG, Guiming *et al.* Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste. **Fire And Materials**, [S.L.], v. 39, n. 8, p. 741-750, 23 out. 2014. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2269>.

WENDT, Sheila Cristina. **Análise da mudança de cor em concretos submetidos a altas temperaturas**. 2006. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

WERNER, Steve *et al.* Fire Spalling of Self-Compacting Concrete Mixtures with Different Limestone Powder Contents. **8**, [s. l], p. 353-363, 2016.

XARGAY, Hernán *et al.* Temperature effects on failure behavior of self-compacting high strength plain and fiber reinforced concrete. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 165, p. 723-734, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.137>.

XING, Zhi *et al.* Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 41, n. 4, p. 392-402, abr. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.005>.

YANG, Hsuanchih; LIN, Yiching; HSIAO, Chiamen; LIU, Jian-You. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. **Fire Safety Journal**, [S.L.], v. 44, n. 1, p. 121-130, jan. 2009.

YE, G. *et al.* Spalling behaviour of small self-compacting concrete slabs under standard fire conditions. **5Th International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete**, [s. l.], p. 799-804, 2009.

YE, G. *et al.* Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. **Cement And Concrete Composites**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 94-102, fev. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>.

YE, G. *et al.* Phase distribution and microstructural changes of self-compacting cement paste at elevated temperature. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 37, n. 6, p. 978-987, jun. 2007. Elsevier BV.

YERMAK, N. *et al.* Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: spalling, transfer and mechanical properties. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 132, p. 240-250, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120>.

ZAHEDI, Farshad; DEHESTANI, Mehdi. Post-fire optimum mechanical properties of self-compacting mortar using Taguchi method and analysis of variance. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 315, p. 125642, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125642>.

ZHU, Wenzhong; BARTOS, Peter J.M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 921-926, jun. 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846\(02\)01090-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0008-8846(02)01090-6).

APÊNDICE A – Resultados de resistência à compressão - curva de dosagem

Traço	Idade (dias)	CP1 (MPa)	CP2 (MPa)
CC 1:3,5	3	29,73	31,51
	7	34,31	34,63
	28	46,83	36,30
	63	48,13	44,31
CC 1:5	3	19,67	17,15
	7	20,59	24,56
	28	37,87	32,15
	63	40,81	38,32
CC 1:6,5	3	15,34	15,02
	7	19,42	21,20
	28	26,94	26,11
	63	32,14	30,81
CAA VMA 1:3,5	3	33,04	33,11
	7	37,99	36,02
	28	46,14	50,55
	63	52,21	51,32
CAA VMA 1:5	3	21,52	20,93
	7	26,60	27,69
	28	34,04	35,20
	63	39,41	38,37
CAA VMA 1:6,5	3	16,77	15,80
	7	17,99	18,49
	28	25,91	26,52
	63	30,69	31,71
CAA NP 1:3,5	3	35,40	37,64
	7	40,43	42,38
	28	54,30	48,89
	63	61,63	54,88
CAA NP 1:5	3	23,33	25,02
	7	28,07	26,67
	28	35,71	32,39
	63	42,77	42,61
CAA NP 1:6,5	3	12,67	12,83
	7	20,44	20,71
	28	28,91	29,29
	63	32,01	31,90

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE B – Estimativa da densidade do concreto no estado fresco

Traço	Identificação da Forma	Forma Vazia (kg)	Forma Cheia (kg)	Concreto (kg)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)
CC 1:3,5	a	3,0070	6,7370	3,7300	1570,80	2,37
	b	3,0110	6,8590	3,8480	1570,80	2,45
	c	3,0240	6,8070	3,7830	1570,80	2,41
CC 1:5	a	3,0290	6,8030	3,7740	1570,80	2,40
	b	3,0020	6,8260	3,8240	1570,80	2,43
	c	3,0260	6,8130	3,7870	1570,80	2,41
CC 1:6,5	a	3,0340	6,7735	3,7395	1570,80	2,38
	b	3,0210	6,7370	3,7160	1570,80	2,37
	c	3,0080	6,7710	3,7630	1570,80	2,40
CAA VMA 1:3,5	a	3,0290	6,8030	3,7740	1570,80	2,40
	b	3,0020	6,8260	3,8240	1570,80	2,43
	c	3,0060	6,8130	3,8070	1570,80	2,42
CAA VMA 1:5	a	2,9870	6,7930	3,8060	1570,80	2,42
	b	3,0350	6,8145	3,7795	1570,80	2,41
	c	3,0025	6,8435	3,8410	1570,80	2,45
CAA VMA 1:6,5	a	3,0045	6,7575	3,7530	1570,80	2,39
	b	3,0205	6,9135	3,8930	1570,80	2,48
	c	2,9745	6,7310	3,7565	1570,80	2,39
CAA NP 1:3,5	a	2,9800	6,8395	3,8595	1570,80	2,46
	b	2,9820	6,8800	3,8980	1570,80	2,48
	c	3,0070	6,8970	3,8900	1570,80	2,48
CAA NP 1:5	a	2,9870	6,7930	3,8060	1570,80	2,42
	b	3,0350	6,8145	3,7795	1570,80	2,41
	c	3,0025	6,8435	3,8410	1570,80	2,45
CAA NP 1:6,5	a	2,9980	6,7845	3,7865	1570,80	2,41
	b	2,9800	6,7425	3,7625	1570,80	2,40
	c	2,9985	6,7580	3,7595	1570,80	2,39

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE C – Massa do concreto no estado endurecido

CC 1:3,5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,7295	3,7260	3,7130	3,7050	3,6975	-	-	-	3,6815	3,6800
2	3,6495	3,6455	3,6320	3,6245	3,6175	-	-	-	3,6020	3,5995
3	3,7110	3,7070	3,6935	3,6865	3,6790	-	-	-	3,6640	3,6620
4	3,7340	3,7290	3,7160	3,7085	3,7010	-	-	-	3,6860	3,6845
5	3,6985	3,6955	3,6825	3,6750	3,6680	-	-	-	3,6525	3,6515
6	3,6820	3,6790	3,6655	3,6585	3,6510	-	-	-	3,6375	3,6345
7	3,7385	3,7350	3,7210	3,7145	3,7075	-	-	-	3,6925	3,6915
8	3,7040	3,6995	3,6865	3,6800	3,6730	-	-	-	3,6575	3,6560
9	3,6840	3,6800	3,6665	3,6600	3,6530	-	-	-	3,6360	3,6370
10	3,7505	3,7475	3,7335	3,7270	3,7200	-	-	-	3,7050	3,7035
11	3,7045	3,7010	3,6870	3,6810	3,6740	-	-	-	3,6595	3,6585
12	3,7135	3,7095	3,6960	3,6900	3,6825	-	-	-	3,6680	3,6665
13	3,7315	3,7265	3,7125	3,7065	3,6990	-	-	-	3,6840	3,6820
14	3,6845	3,6815	3,6675	3,6605	3,6535	-	-	-	3,6380	3,6370
15	3,7105	3,7070	3,6910	3,6870	3,6795	-	-	-	3,6655	3,6630
16	3,7440	3,7405	3,7270	3,7215	3,7145	-	-	-	3,6995	3,6970
17	3,6805	3,6755	3,6615	3,6560	3,6490	-	-	-	3,6340	3,6320
18	3,6995	3,6945	3,6800	3,6745	3,6675	-	-	-	3,6525	3,6500
19	3,7270	3,7230	3,7090	3,7020	3,6955	-	-	-	3,6800	3,6780
20	3,6530	3,6485	3,6345	3,6275	3,6205	-	-	-	3,6060	3,6050
21	3,6830	3,6775	3,6635	3,6565	3,6490	-	-	-	3,6330	3,6320
22	3,7385	3,7350	3,7210	3,7150	3,7080	-	-	-	3,6930	3,6920
23	3,6590	3,6540	3,6395	3,6345	3,6275	-	-	-	3,6720	3,6115
24	3,6775	3,6730	3,6595	3,6545	3,6480	-	-	-	3,6325	3,6320
25	3,7060	3,7030	3,6890	3,6825	3,6765	-	-	-	3,6605	3,6600
26	3,6900	3,6880	3,6740	3,6680	3,6615	-	-	-	3,6455	3,6450
27	3,6655	3,6620	3,6480	3,6420	3,6350	-	-	-	3,6795	3,6185
28	3,7350	3,7305	3,7170	3,7110	3,7035	-	-	-	3,6875	3,6870
29	3,6505	3,6460	3,6330	3,6260	3,6195	-	-	-	3,6045	3,6035
30	3,7165	3,7140	3,7000	3,6930	3,6860	-	-	-	3,6705	3,6710
31	3,6850	3,6815	3,6670	3,6605	3,6535	-	-	-	3,6385	3,6380
32	3,6765	3,6720	3,6585	3,6525	3,6455	-	-	-	3,6305	3,6295
33	3,6765	3,6720	3,6585	3,6515	3,6445	-	-	-	3,6290	3,6280
34	3,6930	3,6890	3,6750	3,6690	3,6625	-	-	-	3,6470	3,6465
35	3,7095	3,7050	3,6915	3,6850	3,6780	-	-	-	3,6630	3,6620
36	3,6650	3,6595	3,6465	3,6400	3,6330	-	-	-	3,6175	3,6165

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,6880	3,6890	3,6565	3,6500	3,6475	3,6425	-	-	-	3,6265
2	3,6690	3,6695	3,6355	3,6295	3,6265	3,6220	-	-	-	3,6060
3	3,6940	3,6920	3,6590	3,6540	3,6495	3,6420	-	-	-	3,6295
4	3,7100	3,7070	3,6745	3,6700	3,6645	3,6595	-	-	-	3,6435
5	3,7025	3,7020	3,6700	3,6655	3,6595	3,6530	-	-	-	3,6390
6	3,7190	3,7185	3,6870	3,6825	3,6765	3,6720	-	-	-	3,6555
7	3,6850	3,6835	3,6525	3,6490	3,6425	3,6385	-	-	-	3,6210
8	3,6920	3,6885	3,6555	3,6525	3,6455	3,6410	-	-	-	3,6240
9	3,6990	3,6985	3,6670	3,6615	3,6565	3,6525	-	-	-	3,6355
10	3,6190	3,6170	3,5855	3,5825	3,5760	3,5710	-	-	-	3,5555
11	3,6895	3,6865	3,6555	3,6480	3,6450	3,6405	-	-	-	3,6255
12	3,6385	3,6355	3,6050	3,5995	3,5940	3,5890	-	-	-	3,5740
13	3,7090	3,7065	3,6760	3,6685	3,6660	3,6605	-	-	-	3,6460
14	3,6920	3,6900	3,6595	3,6555	3,6495	3,6425	-	-	-	3,6295
15	3,6490	3,6465	3,6165	3,6140	3,6065	3,6005	-	-	-	3,5865
16	3,6385	3,6350	3,6060	3,6030	3,5955	3,5905	-	-	-	3,5755
17	3,7035	3,7005	3,6710	3,6670	3,6600	3,6525	-	-	-	3,6400
18	3,6965	3,6940	3,6640	3,6580	3,6525	3,6470	-	-	-	3,6315
19	3,6625	3,6610	3,6310	3,6255	3,6200	3,6135	-	-	-	3,6000
20	3,7070	3,7035	3,6740	3,6675	3,6645	3,6575	-	-	-	3,6450
21	3,7370	3,7370	3,7085	3,7025	3,6980	3,6925	-	-	-	3,6775
22	3,7705	3,7695	3,7400	3,7330	3,7290	3,7240	-	-	-	3,7060
23	3,7025	3,7010	3,6710	3,6685	3,6605	3,6560	-	-	-	3,6405
24	3,6280	3,6255	3,5970	3,5915	3,5865	3,5800	-	-	-	3,5665
25	3,6970	3,6965	3,6655	3,6620	3,6545	3,6495	-	-	-	3,6340
26	3,6325	3,6300	3,5980	3,5935	3,5870	3,5820	-	-	-	3,5650
27	3,6540	3,6515	3,6205	3,6155	3,6095	3,6030	-	-	-	3,5885
28	3,6580	3,6555	3,6240	3,6210	3,6135	3,6075	-	-	-	3,5920
29	3,6425	3,6405	3,6095	3,6060	3,6000	3,5940	-	-	-	3,5790
30	3,7360	3,7345	3,7030	3,6995	3,6935	3,6885	-	-	-	3,6725
31	3,6695	3,6670	3,6385	3,6335	3,6285	3,6255	-	-	-	3,6095
32	3,6020	3,6000	3,5675	3,5650	3,5565	3,5515	-	-	-	3,5355
33	3,6980	3,6970	3,6680	3,6605	3,6580	3,6510	-	-	-	3,6380
34	3,7385	3,7375	3,7090	3,7050	3,6990	3,6935	-	-	-	3,6780
35	3,7070	3,7050	3,6740	3,6695	3,6635	3,6575	-	-	-	3,6425
36	3,6550	3,6530	3,6240	3,6190	3,6140	3,6065	-	-	-	3,5945

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1 6,5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	-	3,6100	3,5525	3,5405	3,5260	3,5195	3,5105	3,5045	3,4990	3,4970
2	-	3,6905	3,6370	3,6255	3,6110	3,6050	3,5970	3,5915	3,5865	3,5835
3	-	3,6395	3,5855	3,5730	3,5580	3,5510	3,5425	3,5375	3,5325	3,5295
4	-	3,5935	3,5385	3,5270	3,5125	3,5055	3,4970	3,4915	3,4860	3,4830
5	-	3,5980	3,5435	3,5330	3,5185	3,5120	3,5040	3,4990	3,4940	3,4910
6	-	3,5605	3,5075	3,4960	3,4820	3,4745	3,4660	3,4605	3,4555	3,4520
7	-	3,6300	3,5735	3,5620	3,5460	3,5410	3,5335	3,5285	3,5230	3,5200
8	-	3,5905	3,5365	3,5260	3,5105	3,5045	3,4970	3,4920	3,4875	3,4840
9	-	3,5930	3,5380	3,5270	3,5110	3,5045	3,4960	3,4910	3,4860	3,4835
10	-	3,6570	3,6040	3,5930	3,5790	3,5730	3,5650	3,5595	3,5550	3,5520
11	-	3,6010	3,5515	3,5405	3,5260	3,5195	3,5120	3,5070	3,5030	3,4990
12	-	3,6505	3,5965	3,5850	3,5700	3,5640	3,5550	3,5505	3,5460	3,5425
13	-	3,6410	3,5905	3,5790	3,5650	3,5590	3,5510	3,5450	3,5405	3,5375
14	-	3,6560	3,6065	3,5960	3,5815	3,5750	3,5675	3,5620	3,5575	3,5545
15	-	3,6175	3,5670	3,5560	3,5410	3,5345	3,5265	3,5210	3,5165	3,5140
16	-	3,5615	3,5105	3,4990	3,4845	3,4780	3,4695	3,4635	3,4590	3,4560
17	-	3,5210	3,4720	3,4615	3,4475	3,4410	3,4330	3,4270	3,4230	3,4205
18	-	3,5325	3,4840	3,4735	3,4595	3,4530	3,4445	3,4395	3,4350	3,4330
19	-	3,5625	3,5120	3,5010	3,4865	3,4800	3,4715	3,4660	3,4615	3,4580
20	-	3,5935	3,5375	3,5275	3,5145	3,5090	3,5005	3,4950	3,4905	3,4880
21	-	3,5895	3,5305	3,5205	3,5070	3,5010	3,4925	3,4870	3,4820	3,4790
22	-	3,5700	3,5115	3,5000	3,4875	3,4810	3,4730	3,4670	3,4625	3,4595
23	-	3,5925	3,5350	3,5240	3,5120	3,5060	3,4970	3,4910	3,4865	3,4830
24	-	3,6196	3,5630	3,5525	3,5395	3,5330	3,5245	3,5185	3,5140	3,5120
25	-	3,6055	3,5490	3,5385	3,5255	3,5190	3,5110	3,5055	3,5010	3,4985
26	-	3,6270	3,5715	3,5625	3,5480	3,5415	3,5340	3,5280	3,5235	3,5205
27	-	3,5570	3,5000	3,4885	3,4765	3,4695	3,4620	3,4565	3,4520	3,4500
28	-	3,6230	3,5650	3,5545	3,5420	3,5360	3,5280	3,5220	3,5180	3,5160
29	-	3,5765	3,5210	3,5095	3,4970	3,4910	3,4830	3,4775	3,4730	3,4705
30	-	3,6320	3,5725	3,5610	3,5470	3,5400	3,5315	3,5255	3,5210	3,5185
31	-	3,6240	3,5660	3,5550	3,5420	3,5350	3,5270	3,5205	3,5155	3,5135
32	-	3,6025	3,5445	3,5335	3,5200	3,5145	3,5055	3,4990	3,4940	3,4915
33	-	3,6600	3,6020	3,5915	3,5785	3,5725	3,5635	3,5570	3,5525	3,5505
34	-	3,6180	3,5605	3,5490	3,5360	3,5300	3,5205	3,5145	3,5095	3,5070
35	-	3,6830	3,6275	3,6180	3,6050	3,5995	3,5920	3,5860	3,5805	3,5785
36	-	3,6100	3,5500	3,5390	3,5260	3,5190	3,5110	3,5055	3,5005	3,4980

(fonte: elaborado pelo autor)

Observação: A densidade calculada para o traço CC1:6,5 para os 3 dias, baseou-se nos dados de 5 CPs. Isso deve-se ao fato de o LEME ter sido fechado devido ao surto de COVID-19 no local.

CAA VMA 1:3,5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	-	-	3,6555	3,4810	3,4740	3,4690	3,4660	3,4625	3,4610	3,4585
2	-	-	3,6610	3,5230	3,5165	3,5115	3,5090	3,5050	3,5035	3,5010
3	-	-	3,5545	3,5980	3,5915	3,5860	3,5835	3,5795	3,5785	3,5765
4	-	-	3,5100	3,5985	3,5925	3,5870	3,5840	3,5805	3,5790	3,5765
5	-	-	3,5510	3,5695	3,5630	3,5580	3,5555	3,5520	3,5505	3,5470
6	-	-	3,6270	3,6000	3,5930	3,5880	3,5845	3,5805	3,5795	3,5760
7	-	-	3,6275	3,5800	3,5735	3,5685	3,5650	3,5615	3,5600	3,5565
8	-	-	3,5970	3,5845	3,5770	3,5710	3,5685	3,5645	3,5630	3,5595
9	-	-	3,6290	3,6345	3,6275	3,6220	3,6195	3,6155	3,6145	3,6115
10	-	-	3,6100	3,6355	3,6290	3,6230	3,6205	3,6165	3,6150	3,6120
11	-	-	3,6145	3,5780	3,5715	3,5665	3,5640	3,5595	3,5580	3,5550
12	-	-	3,6640	3,5300	3,5230	3,5175	3,5150	3,5110	3,5095	3,5065
13	-	-	3,6645	3,5925	3,5860	3,5810	3,5780	3,5745	3,5735	3,5710
14	-	-	3,6065	3,5680	3,5610	3,5565	3,5540	3,5495	3,5485	3,5455
15	-	-	3,5580	3,5910	3,5845	3,5795	3,5765	3,5725	3,5710	3,5675
16	-	-	3,6200	3,6060	3,5990	3,5940	3,5915	3,5875	3,5860	3,5830
17	-	-	3,5960	3,4880	3,4820	3,4770	3,4740	3,4705	3,4690	3,4660
18	-	-	3,6210	3,5605	3,5540	3,5490	3,5455	3,5425	3,5405	3,5375
19	-	-	3,6350	3,5875	3,5840	3,5790	3,5765	3,5735	3,5720	3,5685
20	-	-	3,5155	3,5220	3,5195	3,5145	3,5120	3,5085	3,5070	3,5045
21	-	-	3,5890	3,5645	3,5615	3,5565	3,5535	3,5500	3,5480	3,5455
22	-	-	3,6190	3,5855	3,5830	3,6375	3,6345	3,6310	3,6295	3,6265
23	-	-	3,5525	3,5990	3,5965	3,5910	3,5880	3,5850	3,5835	3,5805
24	-	-	3,5945	3,5035	3,5010	3,4955	3,4925	3,4890	3,4875	3,4845
25	-	-	3,6190	3,5595	3,5565	3,5510	3,5480	3,5445	3,5435	3,5410
26	-	-	3,6295	3,5585	3,5560	3,5505	3,5480	3,5445	3,5430	3,5405
27	-	-	3,5350	3,5255	3,5230	3,5175	3,5150	3,5115	3,5100	3,5080
28	-	-	3,5905	3,6610	3,6580	3,6525	3,6495	3,6465	3,6445	3,6415
29	-	-	3,5885	3,6320	3,6280	3,6235	3,6200	3,6170	3,6155	3,6130
30	-	-	3,5550	3,5440	3,5410	3,5360	3,5335	3,5295	3,5280	3,5255
31	-	-	3,6930	3,5610	3,5580	3,5520	3,5485	3,5450	3,5435	3,5405
32	-	-	3,6630	3,6255	3,6230	3,6175	3,6145	3,6110	3,6095	3,6075
33	-	-	3,5750	3,6105	3,6075	3,6020	3,5990	3,5950	3,5935	3,5905
34	-	-	3,5930	3,6370	3,6340	3,4580	3,4325	3,4325	3,4320	3,4305
35	-	-	3,6655	3,6360	3,6330	3,4550	3,4360	3,4345	3,4340	3,4335
36	-	-	3,6425	3,5945	3,5920	3,4080	3,3855	3,3845	3,3840	3,3835

(fonte: elaborado pelo autor)

Observação: A densidade calculada para o traço CAA VMA 1:3,5 para os 3 e 7 dias, baseou-se nos dados de 4 CPs. Isso deve-se ao fato de o autor ter sido infectado por COVID-19.

CAA VMA 1:5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,6350	3,6355	3,5950	3,5840	3,5735	3,5670	3,5615	3,5580	3,5545	3,5525
2	3,6785	3,6780	3,6390	3,6290	3,6180	3,6125	3,6075	3,6040	3,6005	3,5985
3	3,6670	3,6655	3,6270	3,6170	3,6065	3,6015	3,5965	3,5935	3,5895	3,5880
4	3,6505	3,6500	3,6100	3,5995	3,5890	3,5835	3,5780	3,5755	3,5710	3,5690
5	3,6105	3,6090	3,5690	3,5585	3,5470	3,5420	3,5365	3,5335	3,5290	3,5260
6	3,6455	3,6440	3,6055	3,5960	3,5855	3,5810	3,5750	3,5725	3,5690	3,5665
7	3,6670	3,6655	3,6250	3,6150	3,6045	3,5995	3,5940	3,5915	3,5875	3,5850
8	3,7060	3,7045	3,6630	3,6535	3,6430	3,6385	3,6330	3,6295	3,6255	3,6235
9	3,6970	3,6955	3,6565	3,6460	3,6355	3,6310	3,6255	3,6225	3,6190	3,6165
10	3,7240	3,7230	3,6855	3,6760	3,6650	3,6610	3,6555	3,6530	3,6495	3,6465
11	3,6565	3,6545	3,6150	3,6040	3,5930	3,5885	3,5815	3,5780	3,5745	3,5725
12	3,7070	3,7050	3,6655	3,6550	3,6445	3,6400	3,6340	3,6310	3,6275	3,6250
13	3,6290	3,6285	3,5890	3,5785	3,5685	3,5635	3,5580	3,5550	3,5515	3,5490
14	3,6575	3,6540	3,6165	3,6065	3,5970	3,5920	3,5865	3,5845	3,5810	3,5780
15	3,6225	3,6200	3,5795	3,5685	3,5590	3,5540	3,5480	3,5455	3,5415	3,5390
16	3,5985	3,5955	3,5555	3,5455	3,5360	3,5310	3,5250	3,5225	3,5190	3,5165
17	3,5665	3,5645	3,5235	3,5130	3,5035	3,4985	3,4925	3,4890	3,4865	3,4840
18	3,5665	3,5645	3,5245	3,5140	3,5050	3,4995	3,4940	3,4915	3,4875	3,4850
19	3,5960	3,5935	3,5545	3,5445	3,5350	3,5300	3,5245	3,5215	3,5180	3,5150
20	3,6000	3,5975	3,5585	3,5485	3,5390	3,5335	3,5285	3,5255	3,5220	3,5200
21	3,5765	3,5740	3,5335	3,5230	3,5135	3,5080	3,5030	3,5000	3,4960	3,4930
22	3,6205	3,6180	3,5770	3,5665	3,5575	3,5525	3,5470	3,5445	3,5400	3,5375
23	3,6435	3,6415	3,6010	3,5905	3,5815	3,5760	3,5715	3,5685	3,5645	3,5625
24	3,6515	3,6490	3,6085	3,5975	3,5885	3,5830	3,5780	3,5755	3,5715	3,5690
25	3,5340	3,5315	3,4905	3,4790	3,4700	3,4645	3,4595	3,4565	3,4525	3,4500
26	3,6220	3,6225	3,5820	3,5705	3,5605	3,5555	3,5510	3,5475	3,5435	3,5410
27	3,6025	3,6030	3,5635	3,5530	3,5435	3,5385	3,5330	3,5320	3,5255	3,5235
28	3,5420	3,5400	3,5010	3,4905	3,4815	3,4760	3,4710	3,4685	3,4640	3,4620
29	3,5735	3,5710	3,5300	3,5195	3,5095	3,5045	3,5000	3,4970	3,4925	3,4905
30	3,6685	3,6665	3,6270	3,6160	3,6065	3,6010	3,5960	3,5930	3,5890	3,5870
31	3,6905	3,6865	3,6470	3,6370	3,6280	3,6230	3,6185	3,6160	3,6120	3,6100
32	3,5960	3,5935	3,5510	3,5410	3,5305	3,5255	3,5205	3,5175	3,5130	3,5105
33	3,6400	3,6370	3,5970	3,5865	3,5765	3,5710	3,5655	3,5625	3,5585	3,5560
34	3,6410	3,6375	3,5990	3,5880	3,5785	3,5735	3,5675	3,5645	3,5605	3,5580
35	3,5970	3,5945	3,5570	3,5470	3,5375	3,5330	3,5275	3,5250	3,5205	3,5185
36	3,6090	3,6055	3,5690	3,5580	3,5490	3,5440	3,5390	3,5360	3,5320	3,5300

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:6,5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,4730	3,4410	3,3905	3,3765	3,3620	3,3545	3,3480	3,3420	3,3380	3,3350
2	3,5145	3,4815	3,4285	3,4150	3,3990	3,3915	3,3855	3,3795	3,3755	3,3725
3	3,5490	3,5115	3,4555	3,4415	3,4250	3,4180	3,4115	3,4055	3,4010	3,3985
4	3,5135	3,4915	3,4425	3,4290	3,4135	3,4060	3,4000	3,3935	3,3895	3,3865
5	3,5095	3,4690	3,4240	3,4075	3,3915	3,3845	3,3785	3,3720	3,3680	3,3655
6	3,3625	3,3340	3,2770	3,2625	3,2460	3,2375	3,2320	3,2255	3,2215	3,2185
7	3,5270	3,4810	3,4295	3,4145	3,3990	3,3910	3,3850	3,3795	3,3755	3,3735
8	3,3975	3,3645	3,3190	3,3065	3,2915	3,2845	3,2785	3,2735	3,2695	3,2670
9	3,5205	3,4820	3,4365	3,4220	3,4070	3,3990	3,3930	3,3870	3,3835	3,3820
10	3,5680	3,5255	3,4755	3,4600	3,4430	3,4350	3,4290	3,4225	3,4180	3,4160
11	3,5610	3,5280	3,4745	3,4615	3,4460	3,4380	3,4325	3,4280	3,4240	3,4220
12	3,4905	3,4555	3,4050	3,3915	3,3750	3,3675	3,3620	3,3580	3,3540	3,3510
13	3,5145	3,4765	3,4255	3,4110	3,3940	3,3850	3,3790	3,3745	3,3700	3,3680
14	3,5510	3,5120	3,4690	3,4555	3,4405	3,4330	3,4270	3,4220	3,4175	3,4165
15	3,3780	3,3350	3,2895	3,2755	3,2600	3,2525	3,2470	3,2410	3,2370	3,2350
16	3,5330	3,5020	3,4440	3,4295	3,4130	3,4045	3,3985	3,3930	3,3885	3,3870
17	3,5275	3,4960	3,4410	3,4270	3,4110	3,4030	3,3975	3,3925	3,3885	3,3860
18	3,4250	3,3900	3,3380	3,3255	3,3095	3,3020	3,2955	3,2910	3,2870	3,2855
19	3,5650	3,5280	3,4770	3,4630	3,4475	3,4400	3,4340	3,4295	3,4250	3,4230
20	3,5605	3,5170	3,4700	3,4560	3,4405	3,4330	3,4270	3,4215	3,4180	3,4165
21	3,5420	3,5075	3,4570	3,4435	3,4285	3,4205	3,4150	3,4095	3,4055	3,4040
22	3,5085	3,4710	3,4150	3,4005	3,3840	3,3750	3,3690	3,3640	3,3590	3,3575
23	3,5975	3,5605	3,5100	3,4965	3,4805	3,4715	3,4655	3,4605	3,4560	3,4535
24	3,5680	3,5280	3,4795	3,4650	3,4495	3,4420	3,4360	3,4315	3,4275	3,4250
25	3,5185	3,4775	3,4280	3,4145	3,3990	3,3910	3,3850	3,3800	3,3760	3,3740
26	3,5170	3,4815	3,4330	3,4200	3,4050	3,3970	3,3910	3,3865	3,3820	3,3810
27	3,5205	3,4835	3,4290	3,4145	3,3985	3,3900	3,3840	3,3795	3,3750	3,3730
28	3,5795	3,5435	3,4910	3,4775	3,4620	3,4535	3,4475	3,4430	3,4380	3,4365
29	3,5345	3,4965	3,4485	3,4350	3,4205	3,4120	3,4065	3,4005	3,3960	3,3935
30	3,5880	3,5450	3,4970	3,4840	3,4690	3,4610	3,4550	3,4490	3,4450	3,4435
31	3,4970	3,4600	3,4130	3,4000	3,3860	3,3775	3,3715	3,3665	3,3625	3,3610
32	3,4825	3,4440	3,3965	3,3840	3,3695	3,3615	3,3560	3,3510	3,3470	3,3455
33	3,5175	3,4785	3,4310	3,4180	3,4030	3,3945	3,3885	3,3830	3,3790	3,3780
34	3,5360	3,4990	3,4540	3,4415	3,4265	3,4190	3,4140	3,4075	3,4040	3,4025
35	3,5310	3,4910	3,4470	3,4345	3,4180	3,4110	3,4050	3,3995	3,3955	3,3940
36	3,5660	3,5275	3,4800	3,4665	3,4510	3,4430	3,4370	3,4300	3,4265	3,4235

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:3,5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,7590	3,7600	3,7305	3,7250	3,7205	3,7165	3,7135	3,7100	3,7090	3,7060
2	3,6850	3,6865	3,6565	3,6510	3,6470	3,6430	3,6400	3,6365	3,6350	3,6325
3	3,7125	3,7140	3,6840	3,6785	3,6745	3,6705	3,6675	3,6640	3,6630	3,6605
4	3,7030	3,7045	3,6740	3,6685	3,6645	3,6605	3,6575	3,6540	3,6525	3,6500
5	3,7495	3,7490	3,7185	3,7130	3,7090	3,7055	3,7020	3,6980	3,6945	3,6940
6	3,7570	3,7565	3,7265	3,7210	3,7165	3,7130	3,7095	3,7065	3,7045	3,7025
7	3,7060	3,7065	3,6760	3,6705	3,6660	3,6620	3,6590	3,6550	3,6540	3,6515
8	3,7105	3,7095	3,6815	3,6750	3,6710	3,6675	3,6640	3,6605	3,6590	3,6565
9	3,7835	3,7830	3,7530	3,7480	3,7435	3,7400	3,7370	3,7335	3,7320	3,7300
10	3,6990	3,6990	3,6680	3,6620	3,6575	3,6530	3,6500	3,6465	3,6450	3,6430
11	3,7585	3,7595	3,7305	3,7245	3,7205	3,7170	3,7135	3,7100	3,7090	3,7060
12	3,7265	3,7280	3,6990	3,6925	3,6885	3,6850	3,6815	3,6780	3,6765	3,6740
13	3,7105	3,7125	3,6845	3,6775	3,6740	3,6700	3,6670	3,6630	3,6620	3,6600
14	3,6845	3,6860	3,6580	3,6520	3,6480	3,6445	3,6415	3,6375	3,6365	3,6345
15	3,5810	3,5800	3,5500	3,5440	3,5395	3,5360	3,5325	3,5290	3,5280	3,5255
16	3,7460	3,7470	3,7180	3,7110	3,7070	3,7030	3,6995	3,6960	3,6950	3,6925
17	3,6760	3,6740	3,6455	3,6390	3,6345	3,6305	3,6275	3,6240	3,6225	3,6205
18	3,7300	3,7315	3,7040	3,6975	3,6935	3,6895	3,6855	3,6820	3,6805	3,6785
19	3,7520	3,7530	3,7250	3,7190	3,7150	3,7100	3,7070	3,7035	3,7025	3,7000
20	3,7505	3,7495	3,7215	3,7155	3,7115	3,7075	3,7045	3,7010	3,6995	3,6970
21	3,7115	3,7110	3,6835	3,6770	3,6725	3,6680	3,6650	3,6620	3,6600	3,6580
22	3,7255	3,7255	3,6980	3,6920	3,6880	3,6830	3,6800	3,6765	3,6750	3,6730
23	3,6990	3,6980	3,6715	3,6655	3,6615	3,6570	3,6540	3,6505	3,6490	3,6470
24	3,7545	3,7540	3,7265	3,7200	3,7160	3,7110	3,7085	3,7050	3,7035	3,7010
25	3,7285	3,7295	3,6995	3,6935	3,6890	3,6840	3,6805	3,6775	3,6760	3,6735
26	3,7315	3,7330	3,7065	3,7010	3,6970	3,6925	3,6895	3,6855	3,6845	3,6825
27	3,6885	3,6895	3,6610	3,6545	3,6505	3,6460	3,6435	3,6400	3,6380	3,6360
28	3,6875	3,6905	3,6620	3,6550	3,6510	3,6465	3,6435	3,6400	3,6385	3,6360
29	3,7150	3,7140	3,6870	3,6815	3,6770	3,6725	3,6695	3,6665	3,6650	3,6630
30	3,7185	3,7170	3,6885	3,6815	3,6775	3,6730	3,6695	3,6660	3,6645	3,6625
31	3,7080	3,7090	3,6815	3,6750	3,6710	3,6660	3,6630	3,6595	3,6580	3,6555
32	3,7295	3,7295	3,7020	3,6950	3,6905	3,6860	3,6825	3,6795	3,6780	3,6755
33	3,7035	3,7030	3,6760	3,6685	3,6645	3,6600	3,6565	3,6540	3,6520	3,6500
34	3,7055	3,7065	3,6775	3,6705	3,6660	3,6610	3,6575	3,6550	3,6535	3,6515
35	3,7550	3,7550	3,7275	3,7210	3,7165	3,7125	3,7090	3,7060	3,7050	3,7025
36	3,7065	3,7060	3,6785	3,6720	3,6680	3,6640	3,6605	3,6575	3,6565	3,6540

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,6495	3,6480	3,6030	3,5880	3,5805	3,5755	3,5710	3,5670	3,5635	3,5645
2	3,5580	3,5550	3,5110	3,4955	3,4885	3,4835	3,4790	3,4750	3,4710	3,4705
3	3,6270	3,6230	3,5780	3,5630	3,5560	3,5505	3,5465	3,5425	3,5385	3,5380
4	3,6415	3,6395	3,5940	3,5790	3,5715	3,5670	3,5615	3,5580	3,5545	3,5540
5	3,5855	3,5825	3,5385	3,5215	3,5140	3,5095	3,5040	3,5000	3,4965	3,4960
6	3,6445	3,6410	3,5990	3,5810	3,5740	3,5690	3,5640	3,5595	3,5550	3,5550
7	3,5530	3,5510	3,5090	3,4905	3,4840	3,4780	3,4740	3,4700	3,4660	3,4650
8	3,6700	3,6675	3,6235	3,6065	3,5990	3,5945	3,5895	3,5855	3,5815	3,5805
9	3,6695	3,6660	3,6210	3,6055	3,5985	3,5940	3,5895	3,5855	3,5815	3,5810
10	3,6450	3,6420	3,5940	3,5810	3,5740	3,5685	3,5635	3,5600	3,5560	3,5555
11	3,5945	3,5915	3,5465	3,5325	3,5260	3,5210	3,5160	3,5120	3,5080	3,5085
12	3,5750	3,5715	3,5260	3,5110	3,5045	3,4990	3,4940	3,4905	3,4860	3,4860
13	3,6545	3,6505	3,6065	3,5915	3,5855	3,5805	3,5755	3,5725	3,5680	3,5680
14	3,6400	3,6360	3,5910	3,5775	3,5700	3,5650	3,5605	3,5570	3,5530	3,5535
15	3,6100	3,6075	3,5580	3,5440	3,5365	3,5310	3,5255	3,5215	3,5175	3,5180
16	3,6345	3,6325	3,5880	3,5755	3,5685	3,5635	3,5585	3,5550	3,5510	3,5510
17	3,6060	3,6020	3,5560	3,5420	3,5375	3,5315	3,5265	3,5230	3,5185	3,5195
18	3,6730	3,6695	3,6230	3,6085	3,6040	3,5975	3,5915	3,5885	3,5840	3,5845
19	3,6410	3,6365	3,5910	3,5765	3,5705	3,5650	3,5600	3,5565	3,5520	3,5530
20	3,6260	3,6235	3,5775	3,5640	3,5580	3,5530	3,5475	3,5440	3,5405	3,5410
21	3,6295	3,6255	3,5800	3,5670	3,5605	3,5545	3,5495	3,5460	3,5420	3,5425
22	3,5995	3,5945	3,5505	3,5375	3,5320	3,5260	3,5205	3,5175	3,5130	3,5140
23	3,6850	3,6830	3,6410	3,6285	3,6230	3,6175	3,6125	3,6100	3,6055	3,6065
24	3,6065	3,6025	3,5580	3,5445	3,5380	3,5330	3,5275	3,5245	3,5205	3,5210
25	3,5840	3,5800	3,5345	3,5215	3,5145	3,5095	3,5040	3,5005	3,4970	3,4980
26	3,6445	3,6525	3,6075	3,5940	3,5875	3,5825	3,5770	3,5735	3,5700	3,5705
27	3,6610	3,6575	3,6115	3,5980	3,5915	3,5865	3,5810	3,5780	3,5735	3,5740
28	3,5950	3,5920	3,5440	3,5300	3,5235	3,5180	3,5125	3,5100	3,5055	3,5065
29	3,6380	3,6345	3,5890	3,5755	3,5695	3,5645	3,5590	3,5560	3,5520	3,5535
30	3,6275	3,6235	3,5750	3,5610	3,5545	3,5490	3,5435	3,5400	3,5360	3,5360
31	3,6580	3,6545	3,6075	3,5930	3,5870	3,5810	3,5755	3,5720	3,5685	3,5695
32	3,6600	3,6565	3,6100	3,5960	3,5895	3,5845	3,5795	3,5760	3,5725	3,5730
33	3,6985	3,6950	3,6485	3,6350	3,6285	3,6235	3,6185	3,6150	3,6115	3,6125
34	3,6165	3,6130	3,5665	3,5535	3,5475	3,5425	3,5375	3,5345	3,5320	3,5320
35	3,6110	3,6075	3,5605	3,5470	3,5410	3,5360	3,5310	3,5275	3,5235	3,5245
36	3,7210	3,7165	3,6695	3,6555	3,6490	3,6435	3,6380	3,6345	3,6305	3,6325

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:6,5

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
1	3,5460	3,5395	3,4805	3,4635	3,4540	3,4465	3,4425	3,4370	3,4350	3,4350
2	3,5880	3,5815	3,5195	3,5030	3,4935	3,4865	3,4830	3,4770	3,4750	3,4730
3	3,5735	3,5655	3,5035	3,4860	3,4765	3,4685	3,4645	3,4590	3,4565	3,4550
4	3,6905	3,6825	3,6210	3,6045	3,5945	3,5855	3,5815	3,5755	3,5735	3,5725
5	3,5080	3,5030	3,4430	3,4270	3,4165	3,4095	3,4050	3,3995	3,3975	3,3955
6	3,6530	3,6485	3,5885	3,5725	3,5630	3,5560	3,5520	3,5465	3,5440	3,5425
7	3,6260	3,6205	3,5595	3,5445	3,5340	3,5265	3,5220	3,5165	3,5145	3,5140
8	3,5810	3,5750	3,5125	3,4970	3,4860	3,4780	3,4735	3,4680	3,4655	3,4645
9	3,6275	3,6205	3,5580	3,5405	3,5305	3,5225	3,5190	3,5125	3,5105	3,5100
10	3,6680	3,6595	3,5975	3,5810	3,5700	3,5620	3,5580	3,5520	3,5495	3,5480
11	3,6600	3,6540	3,5925	3,5755	3,5640	3,5555	3,5510	3,5450	3,5430	3,5415
12	3,5045	3,4975	3,4350	3,4175	3,4080	3,4000	3,3960	3,3900	3,3880	3,3870
13	3,6430	3,6375	3,5765	3,5615	3,5515	3,5435	3,5400	3,5340	3,5320	3,5310
14	3,6650	3,6595	3,5985	3,5825	3,5720	3,5640	3,5600	3,5545	3,5515	3,5505
15	3,6430	3,6355	3,5705	3,5530	3,5425	3,5340	3,5300	3,5240	3,5220	3,5200
16	3,6480	3,6415	3,5800	3,5650	3,5535	3,5455	3,5410	3,5350	3,5330	3,5310
17	3,5595	3,5545	3,4960	3,4815	3,4695	3,4605	3,4570	3,4510	3,4485	3,4475
18	3,6385	3,6285	3,5665	3,5500	3,5390	3,5310	3,5270	3,5210	3,5190	3,5180
19	3,6085	3,6000	3,5395	3,5240	3,5130	3,5050	3,5010	3,4955	3,4930	3,4925
20	3,6440	3,6365	3,5755	3,5615	3,5485	3,5400	3,5350	3,5285	3,5260	3,5260
21	3,6505	3,6440	3,5830	3,5675	3,5560	3,5480	3,5435	3,5380	3,5355	3,5355
22	3,5570	3,5515	3,4870	3,4690	3,4580	3,4505	3,4460	3,4400	3,4380	3,4370
23	3,6955	3,6895	3,6300	3,6165	3,6040	3,5965	3,5920	3,5860	3,5840	3,5830
24	3,6640	3,6550	3,5955	3,5810	3,5700	3,5625	3,5580	3,5520	3,5500	3,5485
25	3,5990	3,5910	3,5265	3,5125	3,5025	3,4945	3,4900	3,4840	3,4820	3,4805
26	3,6050	3,5985	3,5330	3,5180	3,5075	3,4995	3,4950	3,4890	3,4865	3,4850
27	3,6740	3,6650	3,6045	3,5885	3,5780	3,5710	3,5665	3,5605	3,5585	3,5575
28	3,6835	3,6760	3,6100	3,5965	3,5865	3,5785	3,5740	3,5685	3,5665	3,5660
29	3,6305	3,6245	3,5630	3,5495	3,5390	3,5320	3,5270	3,5210	3,5190	3,5190
30	3,6410	3,6330	3,5715	3,5575	3,5465	3,5400	3,5345	3,5295	3,5270	3,5260
31	3,6370	3,6285	3,5660	3,5520	3,5405	3,5330	3,5280	3,5225	3,5205	3,5190
32	3,6065	3,5970	3,5340	3,5195	3,5085	3,5015	3,4965	3,4910	3,4885	3,4875
33	3,6300	3,6210	3,5585	3,5440	3,5345	3,5280	3,5235	3,5175	3,5155	3,5145
34	3,6000	3,5930	3,5305	3,5165	3,5050	3,4970	3,4925	3,4860	3,4840	3,4835
35	3,6080	3,6010	3,5370	3,5230	3,5120	3,5045	3,4995	3,4935	3,4910	3,4895
36	3,6910	3,6830	3,6175	3,6020	3,5920	3,5840	3,5795	3,5740	3,5715	3,5705

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE D – Dimensões dos CPs

CP	CC 1:3,5		CC 1:5		CC 1:6,5	
	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)
1	196,3	100,1	197,8	100,1	195,4	100,0
2	196,4	100,0	197,3	100,1	193,6	100,6
3	195,0	100,0	198,2	100,0	197,9	100,7
4	196,0	100,2	198,9	99,9	193,0	100,0
5	195,4	100,0	196,9	100,0	192,7	100,2
6	194,8	99,9	199,7	100,2	191,1	100,0
7	196,6	100,0	197,2	100,0	194,3	100,2
8	195,6	99,8	198,1	100,0	193,3	99,9
9	195,2	100,0	198,1	99,9	194,3	100,5
10	196,0	100,0	195,8	100,1	195,8	100,3
11	195,7	100,1	197,7	100,0	193,2	100,0
12	196,2	100,0	195,0	100,2	197,6	99,9
13	197,0	99,9	198,2	100,1	195,3	99,9
14	195,2	100,2	198,9	99,9	195,7	100,4
15	196,0	100,1	194,6	100,0	194,5	100,0
16	198,3	100,0	196,0	100,1	193,1	100,4
17	194,8	100,0	197,9	100,0	189,6	100,0
18	195,0	100,2	199,9	100,0	189,9	100,0
19	197,0	100,0	198,3	100,1	191,7	100,4
20	194,2	99,9	199,3	100,1	193,0	99,8
21	194,3	100,0	204,9	100,1	192,6	100,4
22	197,1	100,0	202,9	100,0	192,0	100,2
23	194,5	100,1	198,9	99,9	193,1	100,5
24	194,1	100,0	195,1	100,1	194,9	100,1
25	195,5	100,0	197,2	100,0	195,0	99,9
26	196,2	100,3	198,8	100,0	195,2	100,5
27	194,6	100,1	197,8	100,0	191,8	100,3
28	198,3	100,0	199,2	100,1	194,7	100,0
29	193,5	99,9	198,4	100,1	192,2	100,4
30	196,0	100,0	197,9	100,0	196,2	99,9
31	194,3	99,9	198,0	99,9	194,9	99,4
32	196,4	100,0	198,2	100,0	194,6	100,2
33	194,7	99,9	199,1	100,2	197,1	100,5
34	195,8	100,0	197,6	100,1	194,7	100,0
35	197,3	100,2	198,8	100,0	195,1	100,0
36	194,6	100,1	196,2	100,0	197,1	100,0

(fonte: elaborado pelo autor)

CP	CAA VMA 1:3,5		CAA VMA 1:5		CAA VMA 1:6,5	
	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)
1	192,0	99,8	193,4	100,0	190,9	99,9
2	191,6	100,5	194,8	100,0	187,3	100,0
3	186,9	100,0	194,1	99,9	189,5	100,1
4	185,3	100,0	193,4	100,5	189,5	100,0
5	186,2	99,9	191,9	100,3	187,0	100,1
6	189,2	100,8	193,0	100,0	182,7	100,0
7	190,3	100,5	194,0	100,1	189,6	100,0
8	189,1	100,5	195,3	99,5	182,5	100,0
9	190,8	100,0	194,8	100,3	189,1	100,1
10	189,4	100,0	194,7	99,6	194,3	100,1
11	191,4	100,0	194,3	100,0	189,8	100,0
12	192,3	99,9	195,9	99,9	187,8	100,1
13	192,7	99,9	191,7	99,6	189,6	100,0
14	190,5	100,0	192,0	100,1	188,8	100,0
15	188,3	100,0	192,4	99,5	182,6	100,0
16	189,1	100,5	190,9	99,8	191,2	100,0
17	189,0	100,1	189,5	100,0	190,6	100,0
18	189,8	100,2	189,5	100,5	184,9	100,0
19	190,9	100,5	190,1	100,3	191,1	100,0
20	184,9	100,5	191,0	100,2	192,1	100,0
21	188,5	100,2	190,1	100,0	190,6	100,2
22	189,0	100,2	191,0	100,0	190,4	100,0
23	186,9	100,2	192,4	99,9	193,7	99,9
24	189,1	100,0	193,2	100,3	191,4	100,1
25	194,5	100,5	188,1	100,3	191,4	100,0
26	190,5	100,3	192,8	100,0	189,7	99,9
27	186,3	100,9	191,7	99,9	191,3	100,1
28	189,0	100,5	188,3	99,8	193,0	99,9
29	188,7	100,6	190,3	100,4	191,1	99,9
30	187,2	100,3	193,6	100,3	192,9	100,0
31	193,3	100,7	193,6	100,3	187,6	100,1
32	192,6	100,3	191,9	100,0	186,9	100,0
33	187,2	100,2	192,8	100,3	189,3	99,9
34	190,8	100,0	193,0	100,3	189,5	100,0
35	190,0	100,0	190,7	100,0	189,6	100,1
36	191,5	100,5	190,8	100,1	193,3	99,9

(fonte: elaborado pelo autor)

CP	CAA NP 1:3,5		CAA NP 1:5		CAA NP 1:6,5	
	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Comprimento Médio (mm)	Diâmetro Médio (mm)
1	195,5	99,9	193,5	100,0	189,5	100,1
2	193,3	100,0	190,1	100,0	189,8	100,2
3	194,0	99,9	191,5	100,0	190,5	100,1
4	194,1	100,1	192,1	100,0	194,8	100,2
5	196,3	100,1	191,0	100,0	186,7	100,1
6	195,3	100,0	194,1	100,0	192,4	100,2
7	194,2	100,2	190,6	100,0	191,3	100,1
8	193,4	99,9	194,4	100,1	190,9	100,3
9	197,6	100,0	193,5	100,0	193,3	100,2
10	194,1	100,0	193,6	100,0	194,7	100,0
11	197,1	100,1	190,9	100,1	194,6	100,0
12	195,5	100,0	190,8	99,9	186,7	100,0
13	194,5	100,1	194,8	100,0	191,5	100,0
14	193,1	100,2	192,0	100,0	193,6	100,1
15	197,5	100,1	191,4	100,1	194,0	100,0
16	196,0	100,1	193,3	100,1	192,9	100,0
17	193,0	100,0	191,4	100,1	188,9	100,1
18	195,1	100,0	195,4	99,9	193,2	99,9
19	196,4	100,2	193,5	100,0	190,2	100,0
20	195,7	100,0	191,9	100,0	194,1	100,1
21	194,4	100,0	193,1	100,1	193,2	100,1
22	194,3	100,0	190,7	100,0	190,0	100,0
23	193,2	100,1	193,9	100,1	195,5	100,1
24	195,5	100,1	190,9	100,0	192,6	100,0
25	196,1	100,1	190,6	100,0	191,1	99,9
26	194,4	100,0	193,9	100,0	192,7	99,9
27	193,9	99,9	194,8	100,0	194,3	100,1
28	193,7	100,1	191,4	99,8	195,2	100,1
29	192,7	100,2	192,6	100,0	193,3	100,1
30	194,6	100,1	194,0	100,1	193,3	99,9
31	194,3	100,0	195,1	99,9	192,7	100,0
32	193,9	100,4	194,1	100,0	192,2	100,0
33	194,9	100,0	196,3	100,0	191,9	100,0
34	194,3	100,0	190,7	100,0	191,0	99,9
35	195,9	100,1	191,4	99,9	190,9	100,1
36	193,5	100,0	196,3	100,1	195,9	100,1

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE E – Densidade média no estado endurecido

Idade (dias)	CC 1:3,5		CC 1:5		CC 1:6,5	
	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão
3	2,406	0,014	2,365	0,021	2,374	0,000
7	2,403	0,014	2,364	0,021	2,360	0,019
14	2,394	0,014	2,344	0,021	2,324	0,020
21	2,390	0,014	2,341	0,021	2,317	0,020
28	2,385	0,014	2,338	0,021	2,308	0,020
35	0,000	0,000	2,334	0,021	2,304	0,020
42	0,000	0,000	0,000	0,000	2,299	0,020
49	0,000	0,000	0,000	0,000	2,292	0,020
56	2,378	0,014	0,000	0,000	2,292	0,020
63	2,375	0,014	2,325	0,021	2,290	0,020

(fonte: elaborado pelo autor)

Idade (dias)	CAA VMA 1:3,5		CAA VMA 1:5		CAA VMA 1:6,5	
	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão
3	2,426	0,016	2,402	0,018	2,363	0,016
7	2,420	0,007	2,400	0,018	2,339	0,016
14	2,410	0,019	2,374	0,018	2,305	0,017
21	2,390	0,019	2,367	0,018	2,296	0,017
28	2,387	0,018	2,361	0,018	2,285	0,017
35	2,383	0,018	2,357	0,018	2,280	0,017
42	2,381	0,018	2,354	0,018	2,276	0,017
49	2,379	0,018	2,352	0,018	2,276	0,017
56	2,378	0,018	2,349	0,018	2,270	0,017
63	2,376	0,018	2,348	0,018	2,268	0,017

(fonte: elaborado pelo autor)

Idade (dias)	CAA NP 1:3,5		CAA NP 1:5		CAA NP 1:6,5	
	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão	Média (g/cm ³)	Desvio Padrão
3	2,428	0,023	2,398	0,010	2,398	0,011
7	2,428	0,023	2,396	0,010	2,393	0,011
14	2,410	0,023	2,366	0,010	2,352	0,012
21	2,406	0,023	2,357	0,011	2,342	0,012
28	2,403	0,023	2,352	0,011	2,335	0,012
35	2,400	0,023	2,349	0,011	2,330	0,012
42	2,398	0,023	2,346	0,011	2,327	0,012
49	2,396	0,023	2,343	0,011	2,323	0,012
56	2,395	0,023	2,341	0,011	2,321	0,012
63	2,393	0,023	2,341	0,011	2,321	0,012

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE F – Variação de massa – CPs secos em estufa

Traço	CP	Massa Inicial (kg)	Massa Final (kg)	Teor de Umidade (%)
CC 1:3,5	37	3,7960	3,5520	6,43%
	38	3,6805	3,4365	6,63%
	39	3,7065	3,4625	6,58%
CC 1:5	37	3,5860	3,3425	6,79%
	38	3,6610	3,4720	5,16%
	39	3,6630	3,4770	5,08%
CC 1:6,5	37	3,6200	3,3700	6,91%
	38	3,6185	3,3665	6,96%
	39	3,5960	3,3485	6,88%
CAA VMA 1:3,5	37	3,6610	3,4260	6,42%
	38	3,6640	3,4285	6,43%
	39	3,6270	3,3795	6,82%
CAA VMA 1:5	37	3,5350	3,3100	6,36%
	38	3,5950	3,3615	6,50%
	39	3,5930	3,3595	6,50%
CAA VMA 1:6,5	37	3,5235	3,2455	7,89%
	38	3,5235	3,2485	7,80%
	39	3,5130	3,2365	7,87%
CAA NP 1:3,5	37	3,7170	3,4820	6,32%
	38	3,7610	3,5285	6,18%
	39	3,6860	3,4555	6,25%
CAA NP 1:5	37	3,6735	3,4210	6,87%
	38	3,6425	3,3940	6,82%
	39	3,6415	3,3885	6,95%
CAA NP 1:6,5	37	3,5905	3,3325	7,19%
	38	3,6415	3,3840	7,07%
	39	3,6060	3,3485	7,14%

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE G – Variação de massa – CPs em câmara seca e aquecidos

CC 1:3,5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,7295	3,6760	1,43%	-	-	-
	2	3,6495	3,5965	1,45%	-		
	3	3,7110	3,6585	1,41%	-		
	4	3,7340	3,6800	1,45%	-		
	5	3,6985	3,6475	1,38%	-		
	6	3,6820	3,6305	1,40%	-		
200	7	3,7385	3,6875	1,36%	3,4860	5,46%	5,51%
	8	3,7040	3,6520	1,40%	3,4490	5,56%	
	9	3,6840	3,6330	1,38%	3,4335	5,49%	
	10	3,7505	3,7000	1,35%	3,4960	5,51%	
	11	3,7045	3,6545	1,35%	3,4545	5,47%	
	12	3,7135	3,6630	1,36%	3,4595	5,56%	
400	13	3,7315	3,6780	1,43%	3,4285	6,78%	6,87%
	14	3,6845	3,6330	1,40%	3,3775	7,03%	
	15	3,7105	3,6595	1,37%	3,4095	6,83%	
	16	3,7440	3,6940	1,34%	3,4395	6,89%	
	17	3,6805	3,6290	1,40%	3,3800	6,86%	
	18	3,6995	3,6470	1,42%	3,3975	6,84%	
600	19	3,7270	3,6750	1,40%	3,3865	7,85%	7,82%
	20	3,6530	3,6005	1,44%	3,3165	7,89%	
	21	3,6830	3,6280	1,49%	3,3425	7,87%	
	22	3,7385	3,6880	1,35%	3,4010	7,78%	
	23	3,6590	3,6070	1,42%	3,3240	7,85%	
	24	3,6775	3,6275	1,36%	3,3485	7,69%	
800	25	3,7060	3,6560	1,35%	3,3415	8,60%	8,71%
	26	3,6900	3,6405	1,34%	3,3210	8,78%	
	27	3,6655	3,6145	1,39%	3,2970	8,78%	
	28	3,7350	3,6825	1,41%	3,3630	8,68%	
	29	3,6505	3,6000	1,38%	3,2860	8,72%	
	30	3,7165	3,6655	1,37%	3,3465	8,70%	
1000	31	3,6850	3,6340	1,38%	3,3050	9,05%	9,08%
	32	3,6765	3,6255	1,39%	3,2945	9,13%	
	33	3,6765	3,6240	1,43%	3,2945	9,09%	
	34	3,6930	3,6425	1,37%	3,3125	9,06%	
	35	3,7095	3,6580	1,39%	3,3270	9,05%	
	36	3,6650	3,6130	1,42%	3,2835	9,12%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ (%)	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento] (%)	Média (%)
20	1	3,6880	3,6245	1,72%	-	-	-
	2	3,6690	3,6045	1,76%	-		
	3	3,6940	3,6275	1,80%	-		
	4	3,7100	3,6415	1,85%	-		
	5	3,7025	3,6380	1,74%	-		
	6	3,7190	3,6545	1,73%	-		
200	7	3,6850	3,6200	1,76%	3,4225	5,46%	5,42%
	8	3,6920	3,6230	1,87%	3,4265	5,42%	
	9	3,6990	3,6355	1,72%	3,4385	5,42%	
	10	3,6190	3,5555	1,75%	3,3625	5,43%	
	11	3,6895	3,6240	1,78%	3,4290	5,38%	
	12	3,6385	3,5730	1,80%	3,3805	5,39%	
400	13	3,7090	3,6450	1,73%	3,4735	4,71%	6,05%
	14	3,6920	3,6280	1,73%	3,3965	6,38%	
	15	3,6490	3,5860	1,73%	3,3600	6,30%	
	16	3,6385	3,5750	1,75%	3,3510	6,27%	
	17	3,7035	3,6395	1,73%	3,4090	6,33%	
	18	3,6965	3,6310	1,77%	3,4025	6,29%	
600	19	3,6625	3,5985	1,75%	3,3375	7,25%	6,66%
	20	3,7070	3,6435	1,71%	3,3825	7,16%	
	21	3,7370	3,6765	1,62%	3,4700	5,62%	
	22	3,7705	3,7075	1,67%	3,4380	7,27%	
	23	3,7025	3,6390	1,72%	3,3790	7,14%	
	24	3,6280	3,5655	1,72%	3,3700	5,48%	
800	25	3,6970	3,6330	1,73%	3,3480	7,84%	7,81%
	26	3,6325	3,5630	1,91%	3,2820	7,89%	
	27	3,6540	3,5875	1,82%	3,3075	7,80%	
	28	3,6580	3,5905	1,85%	3,3110	7,78%	
	29	3,6425	3,5775	1,78%	3,2980	7,81%	
	30	3,7360	3,6715	1,73%	3,3875	7,74%	
1000	31	3,6695	3,6080	1,68%	3,2380	10,25%	8,32%
	32	3,6020	3,5345	1,87%	3,3110	6,32%	
	33	3,6980	3,6370	1,65%	3,3750	7,20%	
	34	3,7385	3,6770	1,65%	3,3370	9,25%	
	35	3,7070	3,6475	1,61%	3,2950	9,66%	
	36	3,6550	3,5930	1,70%	3,3333	7,23%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:6,5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,6100	3,4935	3,23%	-	-	-
	2	3,6905	3,5815	2,95%	-		
	3	3,6395	3,5255	3,13%	-		
	4	3,5935	3,4805	3,14%	-		
	5	3,5980	3,4885	3,04%	-		
	6	3,5605	3,4490	3,13%	-		
200	7	3,6300	3,5180	3,09%	3,3750	4,06%	4,13%
	8	3,5905	3,4815	3,04%	3,3360	4,18%	
	9	3,5930	3,4810	3,12%	3,3370	4,14%	
	10	3,6570	3,5500	2,93%	3,4055	4,07%	
	11	3,6010	3,4970	2,89%	3,3515	4,16%	
	12	3,6505	3,5405	3,01%	3,3920	4,19%	
400	13	3,6410	3,5350	2,91%	3,3545	5,11%	5,07%
	14	3,6560	3,5520	2,84%	3,3735	5,03%	
	15	3,6175	3,5110	2,94%	3,3315	5,11%	
	16	3,5615	3,4530	3,05%	3,2780	5,07%	
	17	3,5210	3,4180	2,93%	3,2445	5,08%	
	18	3,5325	3,4295	2,92%	3,2570	5,03%	
600	19	3,5625	3,4545	3,03%	3,2435	6,11%	6,03%
	20	3,5935	3,4850	3,02%	3,2755	6,01%	
	21	3,5895	3,4755	3,18%	3,2675	5,98%	
	22	3,5700	3,4555	3,21%	3,2475	6,02%	
	23	3,5925	3,4795	3,15%	3,2700	6,02%	
	24	3,6196	3,5075	3,10%	3,2960	6,03%	
800	25	3,6055	3,4940	3,09%	3,2585	6,74%	6,66%
	26	3,6270	3,5165	3,05%	3,2835	6,63%	
	27	3,5570	3,4460	3,12%	3,2160	6,67%	
	28	3,6230	3,5120	3,06%	3,2800	6,61%	
	29	3,5765	3,4665	3,08%	3,2365	6,63%	
	30	3,6320	3,5145	3,24%	3,2795	6,69%	
1000	31	3,6240	3,5095	3,16%	3,2730	6,74%	6,64%
	32	3,6025	3,4880	3,18%	3,2545	6,69%	
	33	3,6600	3,5465	3,10%	3,3155	6,51%	
	34	3,6180	3,5030	3,18%	3,2665	6,75%	
	35	3,6830	3,5750	2,93%	3,3410	6,55%	
	36	3,6100	3,4940	3,21%	3,2640	6,58%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:3,5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,6555	3,6010	1,49%	-	-	-
	2	3,6610	3,6080	1,45%	-		
	3	3,5545	3,5005	1,52%	-		
	4	3,5100	3,4570	1,51%	-		
	5	3,5510	3,4995	1,45%	-		
	6	3,6270	3,5740	1,46%	-		
200	7	3,6275	3,5755	1,43%	3,3775	5,54%	5,54%
	8	3,5970	3,5465	1,40%	3,3520	5,48%	
	9	3,6290	3,5755	1,47%	3,3785	5,51%	
	10	3,6100	3,5560	1,50%	3,3610	5,48%	
	11	3,6145	3,5595	1,52%	3,3575	5,67%	
	12	3,6640	3,6105	1,46%	3,4105	5,54%	
400	13	3,6645	3,6095	1,50%	3,3615	6,87%	6,89%
	14	3,6065	3,5520	1,51%	3,3025	7,02%	
	15	3,5580	3,5040	1,52%	3,2590	6,99%	
	16	3,6200	3,5675	1,45%	3,3260	6,77%	
	17	3,5960	3,5430	1,47%	3,3000	6,86%	
	18	3,6210	3,5655	1,53%	3,3220	6,83%	
600	19	3,6350	3,5805	1,50%	3,2955	7,96%	7,99%
	20	3,5155	3,4635	1,48%	3,1810	8,16%	
	21	3,5890	3,5345	1,52%	3,2510	8,02%	
	22	3,6190	3,5665	1,45%	3,2875	7,82%	
	23	3,5525	3,5015	1,44%	3,2220	7,98%	
	24	3,5945	3,5430	1,43%	3,2600	7,99%	
800	25	3,6190	3,5660	1,46%	3,2970	7,54%	8,73%
	26	3,6295	3,5780	1,42%	3,2565	8,99%	
	27	3,5350	3,4820	1,50%	3,1680	9,02%	
	28	3,5905	3,5385	1,45%	3,2225	8,93%	
	29	3,5885	3,5370	1,44%	3,2195	8,98%	
	30	3,5550	3,5045	1,42%	3,1925	8,90%	
1000	31	3,6930	3,6410	1,41%	3,3150	8,95%	8,98%
	32	3,6630	3,6120	1,39%	3,2840	9,08%	
	33	3,5750	3,5245	1,41%	3,2095	8,94%	
	34	3,5930	3,5400	1,48%	3,2100	9,32%	
	35	3,6655	3,6070	1,60%	3,2950	8,65%	
	36	3,6425	3,5900	1,44%	3,2695	8,93%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,6350	3,5495	2,35%	-	-	-
	2	3,6785	3,5955	2,26%	-		
	3	3,6670	3,5855	2,22%	-		
	4	3,6505	3,5665	2,30%	-		
	5	3,6105	3,5240	2,40%	-		
	6	3,6455	3,5640	2,24%	-		
200	7	3,6670	3,5840	2,26%	3,4250	4,44%	4,44%
	8	3,7060	3,6220	2,27%	3,4600	4,47%	
	9	3,6970	3,6155	2,20%	3,4550	4,44%	
	10	3,7240	3,6455	2,11%	3,4895	4,28%	
	11	3,6565	3,5700	2,37%	3,4060	4,59%	
	12	3,7070	3,6230	2,27%	3,4630	4,42%	
400	13	3,6290	3,5485	2,22%	3,3450	5,73%	5,68%
	14	3,6575	3,5770	2,20%	3,3790	5,54%	
	15	3,6225	3,5380	2,33%	3,3390	5,62%	
	16	3,5985	3,5165	2,28%	3,3205	5,57%	
	17	3,5665	3,4835	2,33%	3,2815	5,80%	
	18	3,5665	3,4845	2,30%	3,2820	5,81%	
600	19	3,5960	3,5140	2,28%	3,2795	6,67%	6,75%
	20	3,6000	3,5180	2,28%	3,2800	6,77%	
	21	3,5765	3,4920	2,36%	3,2525	6,86%	
	22	3,6205	3,5375	2,29%	3,3015	6,67%	
	23	3,6435	3,5605	2,28%	3,3190	6,78%	
	24	3,6515	3,5675	2,30%	3,3270	6,74%	
800	25	3,5340	3,4470	2,46%	3,1850	7,60%	7,52%
	26	3,6220	3,5375	2,33%	3,2700	7,56%	
	27	3,6025	3,5210	2,26%	3,2580	7,47%	
	28	3,5420	3,4595	2,33%	3,1955	7,63%	
	29	3,5735	3,4870	2,42%	3,2235	7,56%	
	30	3,6685	3,5840	2,30%	3,3230	7,28%	
1000	31	3,6905	3,6080	2,24%	3,3485	7,19%	7,45%
	32	3,5960	3,5085	2,43%	3,2380	7,71%	
	33	3,6400	3,5545	2,35%	3,2830	7,64%	
	34	3,6410	3,5560	2,33%	3,2875	7,55%	
	35	3,5970	3,5170	2,22%	3,2575	7,38%	
	36	3,6090	3,5280	2,24%	3,2720	7,26%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:6,5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,4730	3,3330	4,03%	-	-	-
	2	3,5145	3,3705	4,10%	-		
	3	3,5490	3,3960	4,31%	-		
	4	3,5135	3,3845	3,67%	-		
	5	3,5095	3,3635	4,16%	-		
	6	3,3625	3,2165	4,34%	-		
200	7	3,5270	3,3710	4,42%	3,2355	4,02%	3,93%
	8	3,3975	3,2650	3,90%	3,1370	3,92%	
	9	3,5205	3,3800	3,99%	3,2505	3,83%	
	10	3,5680	3,4140	4,32%	3,2765	4,03%	
	11	3,5610	3,4200	3,96%	3,2905	3,79%	
	12	3,4905	3,3485	4,07%	3,2150	3,99%	
400	13	3,5145	3,3655	4,24%	3,1975	4,99%	4,92%
	14	3,5510	3,4145	3,84%	3,2540	4,70%	
	15	3,3780	3,2330	4,29%	3,0735	4,93%	
	16	3,5330	3,3845	4,20%	3,2130	5,07%	
	17	3,5275	3,3840	4,07%	3,2185	4,89%	
	18	3,4250	3,2830	4,15%	3,1205	4,95%	
600	19	3,5650	3,4205	4,05%	3,2215	5,82%	5,88%
	20	3,5605	3,4140	4,11%	3,2150	5,83%	
	21	3,5420	3,4015	3,97%	3,2045	5,79%	
	22	3,5085	3,3550	4,38%	3,1495	6,13%	
	23	3,5975	3,4510	4,07%	3,2465	5,93%	
	24	3,5680	3,4230	4,06%	3,2245	5,80%	
800	25	3,5185	3,3715	4,18%	3,1460	6,69%	6,69%
	26	3,5170	3,3785	3,94%	3,1530	6,67%	
	27	3,5205	3,3705	4,26%	3,1405	6,82%	
	28	3,5795	3,4340	4,06%	3,2030	6,73%	
	29	3,5345	3,3915	4,05%	3,1670	6,62%	
	30	3,5880	3,4410	4,10%	3,2140	6,60%	
1000	31	3,4970	3,3580	3,97%	3,1370	6,58%	6,61%
	32	3,4825	3,3430	4,01%	3,1255	6,51%	
	33	3,5175	3,3750	4,05%	3,1495	6,68%	
	34	3,5360	3,4000	3,85%	3,1785	6,51%	
	35	3,5310	3,3920	3,94%	3,1695	6,56%	
	36	3,5660	3,4215	4,05%	3,1875	6,84%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:3,5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,7590	3,7050	1,44%	-	-	-
	2	3,6850	3,6320	1,44%	-		
	3	3,7125	3,6600	1,41%	-		
	4	3,7030	3,6490	1,46%	-		
	5	3,7495	3,6930	1,51%	-		
	6	3,7570	3,7015	1,48%	-		
200	7	3,7060	3,6510	1,48%	3,4570	5,31%	5,25%
	8	3,7105	3,6560	1,47%	3,4625	5,29%	
	9	3,7835	3,7295	1,43%	3,5375	5,15%	
	10	3,6990	3,6425	1,53%	3,4505	5,27%	
	11	3,7585	3,7060	1,40%	3,5115	5,25%	
	12	3,7265	3,6735	1,42%	3,4820	5,21%	
400	13	3,7105	3,6590	1,39%	3,4175	6,60%	5,68%
	14	3,6845	3,6335	1,38%	3,3915	6,66%	
	15	3,5810	3,5245	1,58%	3,4795	1,28%	
	16	3,7460	3,6915	1,45%	3,4520	6,49%	
	17	3,6760	3,6190	1,55%	3,3800	6,60%	
	18	3,7300	3,6775	1,41%	3,4405	6,44%	
600	19	3,7520	3,7000	1,39%	3,4075	7,91%	7,92%
	20	3,7505	3,6970	1,43%	3,4085	7,80%	
	21	3,7115	3,6575	1,45%	3,3635	8,04%	
	22	3,7255	3,6720	1,44%	3,3795	7,97%	
	23	3,6990	3,6465	1,42%	3,3575	7,93%	
	24	3,7545	3,7010	1,42%	3,4095	7,88%	
800	25	3,7285	3,6730	1,49%	3,3450	8,93%	8,76%
	26	3,7315	3,6815	1,34%	3,3690	8,49%	
	27	3,6885	3,6350	1,45%	3,3130	8,86%	
	28	3,6875	3,6360	1,40%	3,3155	8,81%	
	29	3,7150	3,6620	1,43%	3,3455	8,64%	
	30	3,7185	3,6620	1,52%	3,3395	8,81%	
1000	31	3,7080	3,6555	1,42%	3,3345	8,78%	8,87%
	32	3,7295	3,6750	1,46%	3,3460	8,95%	
	33	3,7035	3,6490	1,47%	3,3205	9,00%	
	34	3,7055	3,6505	1,48%	3,3185	9,09%	
	35	3,7550	3,7020	1,41%	3,3795	8,71%	
	36	3,7065	3,6530	1,44%	3,3350	8,71%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,6495	3,5610	2,42%	-	-	-
	2	3,5580	3,4680	2,53%	-		
	3	3,6270	3,5350	2,54%	-		
	4	3,6415	3,5515	2,47%	-		
	5	3,5855	3,4935	2,57%	-		
	6	3,6445	3,5520	2,54%	-		
200	7	3,5530	3,4622	2,56%	3,2940	4,86%	4,72%
	8	3,6700	3,5780	2,51%	3,4090	4,72%	
	9	3,6695	3,5785	2,48%	3,4155	4,55%	
	10	3,6450	3,5530	2,52%	3,3875	4,66%	
	11	3,5945	3,5050	2,49%	3,3415	4,66%	
	12	3,5750	3,4830	2,57%	3,3135	4,87%	
400	13	3,6545	3,5650	2,45%	3,3570	5,83%	5,84%
	14	3,6400	3,5500	2,47%	3,3455	5,76%	
	15	3,6100	3,5150	2,63%	3,3035	6,02%	
	16	3,6345	3,5485	2,37%	3,3455	5,72%	
	17	3,6060	3,5160	2,50%	3,3100	5,86%	
	18	3,6730	3,5810	2,50%	3,3710	5,86%	
600	19	3,6410	3,5495	2,51%	3,3005	7,02%	6,86%
	20	3,6260	3,5380	2,43%	3,2960	6,84%	
	21	3,6295	3,5395	2,48%	3,2910	7,02%	
	22	3,5995	3,5105	2,47%	3,2705	6,84%	
	23	3,6850	3,6035	2,21%	3,3660	6,59%	
	24	3,6065	3,5180	2,45%	3,2765	6,86%	
800	25	3,5840	3,4950	2,48%	3,2235	7,77%	7,79%
	26	3,6445	3,5675	2,11%	3,2930	7,69%	
	27	3,6610	3,5710	2,46%	3,2925	7,80%	
	28	3,5950	3,5030	2,56%	3,2240	7,96%	
	29	3,6380	3,5500	2,42%	3,2805	7,59%	
	30	3,6275	3,5330	2,61%	3,2540	7,90%	
1000	31	3,6580	3,5665	2,50%	3,2910	7,72%	7,64%
	32	3,6600	3,5700	2,46%	3,2955	7,69%	
	33	3,6985	3,6095	2,41%	3,3325	7,67%	
	34	3,6165	3,5290	2,42%	3,2625	7,55%	
	35	3,6110	3,5215	2,48%	3,2545	7,58%	
	36	3,7210	3,6285	2,49%	3,3520	7,62%	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:6,5

Temperatura (°C)	CP	Massa Inicial (kg)	Massa pré aquecimento (kg)	Δ	Massa pós aquecimento (kg)	Δ [massa pré aquecimento]	Média
20	1	3,5460	3,4315	3,23%	-	-	-
	2	3,5880	3,4705	3,27%	-		
	3	3,5735	3,4520	3,40%	-		
	4	3,6905	3,5690	3,29%	-		
	5	3,5080	3,3925	3,29%	-		
	6	3,6530	3,5400	3,09%	-		
200	7	3,6260	3,5110	3,17%	3,3705	4,00%	4,14%
	8	3,5810	3,4615	3,34%	3,3155	4,22%	
	9	3,6275	3,5065	3,34%	3,3625	4,11%	
	10	3,6680	3,5450	3,35%	3,4000	4,09%	
	11	3,6600	3,5385	3,32%	3,3915	4,15%	
	12	3,5045	3,3840	3,44%	3,2390	4,28%	
400	13	3,6430	3,5285	3,14%	3,3525	4,99%	5,07%
	14	3,6650	3,5470	3,22%	3,3690	5,02%	
	15	3,6430	3,5170	3,46%	3,3355	5,16%	
	16	3,6480	3,5285	3,28%	3,3505	5,04%	
	17	3,5595	3,4450	3,22%	3,2700	5,08%	
	18	3,6385	3,5150	3,39%	3,3355	5,11%	
600	19	3,6085	3,4890	3,31%	3,2795	6,00%	6,08%
	20	3,6440	3,5220	3,35%	3,3015	6,26%	
	21	3,6505	3,5325	3,23%	3,3145	6,17%	
	22	3,5570	3,4340	3,46%	3,2195	6,25%	
	23	3,6955	3,5805	3,11%	3,3670	5,96%	
	24	3,6640	3,5450	3,25%	3,3375	5,85%	
800	25	3,5990	3,4775	3,38%	3,2430	6,74%	6,74%
	26	3,6050	3,4820	3,41%	3,2395	6,96%	
	27	3,6740	3,5545	3,25%	3,3170	6,68%	
	28	3,6835	3,5630	3,27%	3,3250	6,68%	
	29	3,6305	3,5155	3,17%	3,2805	6,68%	
	30	3,6410	3,5230	3,24%	3,2880	6,67%	
1000	31	3,6370	3,5160	3,33%	3,2785	6,75%	6,78%
	32	3,6065	3,4845	3,38%	3,2455	6,86%	
	33	3,6300	3,5115	3,26%	3,2740	6,76%	
	34	3,6000	3,4805	3,32%	3,2435	6,81%	
	35	3,6080	3,4870	3,35%	3,2515	6,75%	
	36	3,6910	3,5675	3,35%	3,3280	6,71%	

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE H – Dados Ultrassom

CC 1:3,5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	42,2	4652	4652	20	-	-	-
2	20	41,6	4720	espúrio	20	-	-	-
3	20	41,6	4688	espúrio	20	-	-	-
4	20	42,2	4645	4645	20	-	-	-
5	20	41,9	4663	4663	20	-	-	-
6	20	41,9	4650	4650	20	-	-	-
7	20	41,9	4693	espúrio	200	49,2	3997	espúrio
8	20	41,9	4669	4669	200	49,4	3960	3960
9	20	41,9	4658	4658	200	48,9	3991	3991
10	20	42,4	4622	espúrio	200	49,7	3943	espúrio
11	20	42,4	4615	espúrio	200	49,1	3985	3985
12	20	42,4	4627	4627	200	49,9	3932	espúrio
13	20	42,4	4647	4647	400	60,9	3235	3235
14	20	42,4	4604	espúrio	400	60,9	3205	3205
15	20	42,4	4622	espúrio	400	60,6	3234	3234
16	20	42,4	4676	4676	400	62,6	3167	3167
17	20	41,4	4705	espúrio	400	62,7	3106	espúrio
18	20	41,4	4710	espúrio	400	59,1	3299	espúrio
19	20	42,4	4645	4645	600	103,7	1899	espúrio
20	20	41,4	4690	espúrio	600	105,1	1847	1847
21	20	41,4	4692	espúrio	600	106,1	1831	1831
22	20	42,4	4649	4649	600	108,2	1822	espúrio
23	20	41,9	4643	4643	600	104,6	1860	1860
24	20	41,9	4632	4632	600	103,2	1881	1881
25	20	41,9	4667	4667	800	135,9	1439	1439
26	20	42,4	4628	4628	800	136,2	1441	1441
27	20	41,9	4645	4645	800	141,2	1378	espúrio
28	20	42,4	4678	4678	800	140,2	1415	1415
29	20	41,9	4619	espúrio	800	131,2	1475	1475
30	20	42,4	4623	espúrio	800	128,8	1522	espúrio
31	20	41,4	4694	espúrio	1000	166,4	1168	espúrio
32	20	42,4	4632	4632	1000	161,1	1219	1219
33	20	41,4	4704	espúrio	1000	153,2	1271	espúrio
34	20	42,4	4618	espúrio	1000	156,9	1248	1248
35	20	42,6	4631	4631	1000	164,6	1198	1198
36	20	42,1	4622	espúrio	1000	157,1	1238	1238

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	45,7	4328	espúrio	20	-	-	-
2	20	44,6	4423	4423	20	-	-	-
3	20	44,7	4435	espúrio	20	-	-	-
4	20	45,7	4352	4352	20	-	-	-
5	20	44,4	4434	espúrio	20	-	-	-
6	20	45,1	4427	4427	20	-	-	-
7	20	45,1	4372	4372	200	52,6	3748	3748
8	20	45,4	4363	4363	200	52,9	3745	3745
9	20	44,4	4462	espúrio	200	53,1	3731	3731
10	20	44,1	4439	espúrio	200	52,4	3736	3736
11	20	45,4	4354	4354	200	53,1	3723	espúrio
12	20	44,6	4373	4373	200	51,9	3758	espúrio
13	20	45,4	4366	4366	400	64,4	3078	3078
14	20	44,6	4460	espúrio	400	65,4	3042	3042
15	20	45,2	4306	espúrio	400	66,9	2909	espúrio
16	20	45,4	4316	espúrio	400	63,1	3106	espúrio
17	20	44,9	4408	4408	400	65,4	3026	3026
18	20	45,4	4402	4402	400	65,1	3070	3070
19	20	45,4	4368	4368	600	107,9	1838	espúrio
20	20	45,4	4389	4389	600	114,6	1739	1739
21	20	45,6	4494	espúrio	600	123,4	1661	espúrio
22	20	46,9	4327	espúrio	600	114,4	1774	1774
23	20	45,4	4380	4380	600	110,9	1793	1793
24	20	44,9	4345	4345	600	114,6	1702	1702
25	20	44,9	4392	4392	800	150,7	1309	espúrio
26	20	45,9	4330	espúrio	800	151,9	1309	espúrio
27	20	45,4	4358	4358	800	134,1	1475	1475
28	20	45,4	4387	4387	800	134,1	1485	1485
29	20	45,2	4389	4389	800	133,4	1487	1487
30	20	44,9	4408	4408	800	129,6	1527	espúrio
31	20	45,1	4390	4390	1000	203,0	975	espúrio
32	20	45,4	4365	4365	1000	205,0	967	967
33	20	45,2	4406	4406	1000	219,0	909	909
34	20	45,9	4305	espúrio	1000	209,0	945	945
35	20	44,9	4428	4428	1000	240,0	828	espúrio
36	20	44,9	4369	4369	1000	231,0	849	espúrio

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:6,5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	44,9	4353	espúrio	20	-	-	-
2	20	45,9	4218	espúrio	20	-	-	-
3	20	44,9	4408	espúrio	20	-	-	-
4	20	44,6	4327	4327	20	-	-	-
5	20	44,7	4312	4312	20	-	-	-
6	20	43,9	4352	espúrio	20	-	-	-
7	20	45,2	4299	4299	200	51,9	3744	espúrio
8	20	44,9	4305	4305	200	51,7	3739	3739
9	20	45,4	4280	4280	200	53,4	3639	espúrio
10	20	45,6	4293	4293	200	52,6	3722	3722
11	20	45,6	4237	4237	200	52,4	3687	3687
12	20	45,4	4352	espúrio	200	53,6	3687	3687
13	20	45,4	4302	4302	400	68,4	2856	2856
14	20	45,4	4311	4311	400	69,1	2832	2832
15	20	45,4	4284	4284	400	65,4	2974	espúrio
16	20	44,4	4350	espúrio	400	65,4	2953	espúrio
17	20	45,7	4149	espúrio	400	67,9	2792	espúrio
18	20	44,7	4248	4248	400	67,6	2809	2809
19	20	44,7	4289	4289	600	130,2	1473	espúrio
20	20	45,1	4279	4279	600	139,1	1387	1387
21	20	44,9	4290	4290	600	137,9	1397	1397
22	20	45,7	4202	espúrio	600	141,9	1353	espúrio
23	20	44,9	4301	4301	600	139,2	1387	1387
24	20	45,4	4292	4292	600	136,9	1423	1423
25	20	45,6	4276	4276	800	210,0	928	espúrio
26	20	45,2	4318	4318	800	229,0	852	852
27	20	44,4	4320	4320	800	223,0	860	860
28	20	45,9	4241	4241	800	224,0	869	869
29	20	45,4	4233	espúrio	800	226,0	850	850
30	20	46,4	4228	espúrio	800	238,0	824	espúrio
31	20	45,9	4247	4247	1000	238,0	819	819
32	20	45,7	4257	4257	1000	227,0	857	857
33	20	46,1	4275	4275	1000	227,0	868	espúrio
34	20	45,9	4243	4243	1000	244,0	798	798
35	20	45,9	4250	4250	1000	231,0	844	844
36	20	46,4	4247	4247	1000	257,0	767	espúrio

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:3,5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	41,9	4582	4582	20	-	-	-
2	20	42,2	4541	espúrio	20	-	-	-
3	20	40,6	4603	4603	20	-	-	-
4	20	40,6	4563	4563	20	-	-	-
5	20	40,4	4609	4609	20	-	-	-
6	20	41,2	4592	4592	20	-	-	-
7	20	41,4	4597	4597	200	48,4	3933	espúrio
8	20	40,9	4623	espúrio	200	48,6	3891	3891
9	20	41,9	4554	espúrio	200	49,4	3862	3862
10	20	41,4	4575	4575	200	48,4	3913	3913
11	20	42,1	4546	espúrio	200	49,4	3874	3874
12	20	41,9	4589	4589	200	50,2	3830	espúrio
13	20	41,9	4600	4600	400	61,6	3129	3129
14	20	41,4	4601	4601	400	60,4	3154	espúrio
15	20	41,4	4548	espúrio	400	60,4	3118	3118
16	20	40,9	4623	espúrio	400	60,9	3105	espúrio
17	20	41,4	4564	4564	400	60,6	3118	3118
18	20	41,6	4563	4563	400	60,9	3117	3117
19	20	41,4	4610	4610	600	87,1	2191	2191
20	20	40,4	4577	4577	600	84,1	2199	2199
21	20	41,4	4554	espúrio	600	84,7	2226	espúrio
22	20	41,1	4599	4599	600	87,6	2158	2158
23	20	40,6	4603	4603	600	85,7	2180	2180
24	20	41,4	4568	4568	600	89,9	2104	espúrio
25	20	41,9	4642	espúrio	800	126,7	1535	1535
26	20	42,1	4525	espúrio	800	124,6	1529	1529
27	20	40,9	4555	espúrio	800	121,2	1537	1537
28	20	41,4	4565	4565	800	124,1	1523	1523
29	20	41,4	4558	4558	800	119,7	1576	espúrio
30	20	40,6	4610	4610	800	122,1	1533	1533
31	20	41,9	4613	espúrio	1000	139,1	1389	1389
32	20	41,9	4597	4597	1000	140,9	1367	espúrio
33	20	40,9	4578	4578	1000	131,1	1428	espúrio
34	20	41,9	4554	espúrio	1000	136,6	1397	1397
35	20	40,9	4645	espúrio	1000	135,1	1406	1406
36	20	41,7	4593	4593	1000	139,6	1372	espúrio

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	43,9	4405	4405	20	-	-	-
2	20	44,4	4388	4388	20	-	-	-
3	20	44,1	4401	4401	20	-	-	-
4	20	43,9	4405	4405	20	-	-	-
5	20	43,6	4402	4402	20	-	-	-
6	20	43,9	4396	4396	20	-	-	-
7	20	43,4	4471	espúrio	200	50,9	3812	espúrio
8	20	44,1	4429	4429	200	52,1	3749	3749
9	20	43,9	4437	espúrio	200	51,9	3753	3753
10	20	44,2	4406	4406	200	51,4	3789	3789
11	20	44,4	4375	4375	200	51,7	3758	3758
12	20	44,7	4383	4383	200	52,4	3739	espúrio
13	20	44,1	4348	espúrio	400	62,6	3063	espúrio
14	20	43,4	4423	4423	400	64,4	2981	2981
15	20	43,4	4434	4434	400	64,9	2965	2965
16	20	43,4	4399	4399	400	63,1	3025	3025
17	20	43,4	4366	espúrio	400	64,9	2919	espúrio
18	20	43,7	4336	espúrio	400	64,9	2920	espúrio
19	20	43,4	4379	4379	600	112,6	1688	espúrio
20	20	43,6	4381	4381	600	118,1	1617	1617
21	20	43,4	4379	4379	600	119,7	1588	espúrio
22	20	42,9	4451	espúrio	600	113,7	1680	espúrio
23	20	43,4	4432	4432	600	116,9	1646	1646
24	20	43,9	4402	4402	600	117,2	1649	1649
25	20	42,4	4436	espúrio	800	131,4	1431	espúrio
26	20	44,6	4324	espúrio	800	141,1	1367	1367
27	20	43,4	4418	4418	800	139,7	1372	1372
28	20	42,6	4421	4421	800	133,1	1415	1415
29	20	43,1	4415	4415	800	137,6	1383	1383
30	20	44,2	4381	4381	800	144,9	1336	espúrio
31	20	43,4	4461	espúrio	1000	177,4	1091	1091
32	20	43,9	4372	4372	1000	175,7	1092	1092
33	20	43,7	4412	4412	1000	173,6	1111	espúrio
34	20	43,9	4397	4397	1000	176,1	1096	1096
35	20	43,1	4424	4424	1000	174,4	1093	1093
36	20	43,1	4428	4428	1000	177,1	1078	espúrio

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:6,5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	46,4	4113	espúrio	20	-	-	-
2	20	46,4	4037	4037	20	-	-	-
3	20	46,2	4102	espúrio	20	-	-	-
4	20	46,2	4102	espúrio	20	-	-	-
5	20	45,2	4137	espúrio	20	-	-	-
6	20	44,6	4096	espúrio	20	-	-	-
7	20	47,2	4018	espúrio	200	54,8	3460	espúrio
8	20	44,6	4091	4091	200	51,3	3557	espúrio
9	20	46,9	4031	4031	200	53,3	3547	3547
10	20	47,9	4056	4056	200	55,1	3526	3526
11	20	46,4	4091	4091	200	53,8	3529	3529
12	20	46,4	4048	4048	200	53,2	3531	3531
13	20	47,2	4016	espúrio	400	67,0	2829	2829
14	20	45,9	4113	espúrio	400	66,6	2835	2835
15	20	44,4	4112	espúrio	400	64,1	2848	2848
16	20	47,4	4034	4034	400	66,6	2871	espúrio
17	20	47,6	4004	espúrio	400	67,8	2811	espúrio
18	20	45,8	4028	espúrio	400	65,1	2840	2840
19	20	47,1	4058	4058	600	126,2	1515	1515
20	20	47,7	4028	espúrio	600	123,4	1557	espúrio
21	20	46,7	4081	4081	600	129,3	1474	espúrio
22	20	47,1	4042	4042	600	125,4	1518	1518
23	20	47,9	4044	4044	600	127,9	1514	1514
24	20	47,1	4064	4064	600	130,9	1462	espúrio
25	20	47,1	4064	4064	800	174,4	1097	1097
26	20	46,9	4045	4045	800	180,6	1050	1050
27	20	47,4	4036	4036	800	174,5	1096	1096
28	20	47,7	4045	4045	800	186,7	1034	espúrio
29	20	47,4	4032	4032	800	173,4	1102	espúrio
30	20	47,4	4070	4070	800	181,0	1066	1066
31	20	45,9	4087	4087	1000	193,7	969	969
32	20	45,9	4073	4073	1000	189,9	984	espúrio
33	20	46,6	4062	4062	1000	195,8	967	967
34	20	46,9	4041	4041	1000	198,3	956	espúrio
35	20	47,1	4026	espúrio	1000	197,5	960	960
36	20	47,7	4053	4053	1000	196,5	984	espúrio

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:3,5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	42,4	4612	4612	20	-	-	-
2	20	41,9	4614	4614	20	-	-	-
3	20	41,9	4631	espúrio	20	-	-	-
4	20	42,4	4579	4579	20	-	-	-
5	20	42,4	4630	espúrio	20	-	-	-
6	20	42,4	4606	4606	20	-	-	-
7	20	42,2	4603	4603	200	48,4	4013	4013
8	20	42,1	4594	4594	200	47,9	4038	4038
9	20	42,9	4605	4605	200	49,4	3999	espúrio
10	20	42,4	4577	4577	200	48,2	4026	4026
11	20	42,6	4628	espúrio	200	48,8	4040	4040
12	20	42,2	4632	espúrio	200	48,0	4072	espúrio
13	20	42,4	4586	4586	400	59,1	3290	espúrio
14	20	42,1	4587	4587	400	58,3	3313	3313
15	20	42,9	4603	4603	400	59,3	3330	3330
16	20	42,7	4589	4589	400	58,8	3333	3333
17	20	41,9	4606	4606	400	58,2	3316	3316
18	20	41,9	4656	espúrio	400	58,0	3363	espúrio
19	20	42,9	4577	4577	600	92,5	2123	2123
20	20	42,6	4595	4595	600	92,2	2123	2123
21	20	42,4	4585	4585	600	90,4	2150	espúrio
22	20	42,4	4583	4583	600	90,9	2138	2138
23	20	42,1	4590	4590	600	89,6	2157	espúrio
24	20	42,7	4578	4578	600	92,2	2120	espúrio
25	20	42,9	4571	espúrio	800	114,4	1714	1714
26	20	42,4	4586	4586	800	113,3	1716	1716
27	20	41,9	4628	espúrio	800	112,9	1717	espúrio
28	20	42,4	4568	espúrio	800	113,2	1711	1711
29	20	42,2	4566	espúrio	800	112,7	1710	1710
30	20	42,4	4589	4589	800	113,9	1708	espúrio
31	20	41,9	4636	espúrio	1000	147,3	1319	espúrio
32	20	42,1	4605	4605	1000	146,0	1328	1328
33	20	42,4	4596	4596	1000	143,2	1361	espúrio
34	20	42,4	4583	4583	1000	147,3	1319	1319
35	20	42,9	4567	espúrio	1000	146,6	1337	1337
36	20	42,4	4564	espúrio	1000	144,9	1335	1335

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	43,4	4459	espúrio	20	0,0	-	-
2	20	43,2	4400	4400	20	0,0	-	-
3	20	43,7	4381	espúrio	20	0,0	-	-
4	20	43,5	4417	4417	20	0,0	-	-
5	20	43,4	4401	4401	20	0,0	-	-
6	20	43,9	4421	4421	20	0,0	-	-
7	20	43,4	4392	4392	200	49,9	3820	espúrio
8	20	43,9	4429	4429	200	51,4	3783	3783
9	20	43,5	4448	espúrio	200	51,0	3794	3794
10	20	43,8	4419	4419	200	51,2	3781	3781
11	20	43,4	4399	4399	200	50,6	3773	espúrio
12	20	43,6	4375	espúrio	200	50,2	3800	3800
13	20	44,4	4387	espúrio	400	63,8	3053	espúrio
14	20	43,6	4403	4403	400	61,4	3126	espúrio
15	20	43,7	4381	espúrio	400	62,3	3073	3073
16	20	44,1	4384	espúrio	400	61,8	3128	espúrio
17	20	43,4	4411	4411	400	62,2	3078	3078
18	20	44,5	4390	4390	400	63,9	3057	3057
19	20	43,9	4408	4408	600	105,3	1838	espúrio
20	20	43,4	4422	4422	600	107,7	1782	1782
21	20	44,0	4389	4389	600	115,0	1679	1679
22	20	43,4	4393	4393	600	118,5	1609	espúrio
23	20	44,1	4396	4396	600	118,6	1635	1635
24	20	43,1	4430	espúrio	600	114,8	1663	1663
25	20	43,4	4391	4391	800	150,1	1270	1270
26	20	43,8	4427	4427	800	153,1	1266	espúrio
27	20	43,9	4438	espúrio	800	150,1	1298	espúrio
28	20	43,3	4421	4421	800	150,7	1270	1270
29	20	43,7	4407	4407	800	150,8	1277	1277
30	20	44,4	4369	espúrio	800	149,7	1296	espúrio
31	20	44,4	4394	4394	1000	165,5	1179	1179
32	20	43,9	4422	4422	1000	165,5	1173	1173
33	20	44,3	4430	espúrio	1000	164,1	1196	espúrio
34	20	42,9	4444	espúrio	1000	160,2	1190	1190
35	20	43,4	4411	4411	1000	160,5	1193	1193
36	20	44,4	4421	4421	1000	169,5	1158	espúrio

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:6,5

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado(m/s)
1	20	43,4	4366	espúrio	20	-	-	-
2	20	43,9	4324	4324	20	-	-	-
3	20	43,9	4340	4340	20	-	-	-
4	20	45,0	4328	4328	20	-	-	-
5	20	43,1	4332	4332	20	-	-	-
6	20	44,2	4352	4352	20	-	-	-
7	200	43,9	4358	espúrio	200	52,0	3679	3679
8	200	43,9	4349	4349	200	51,8	3685	3685
9	200	44,6	4333	4333	200	52,6	3674	3674
10	200	44,5	4376	espúrio	200	52,6	3702	espúrio
11	200	44,9	4335	4335	200	52,9	3679	3679
12	200	43,5	4291	4291	200	51,1	3653	espúrio
13	400	43,5	4402	espúrio	400	66,9	2862	espúrio
14	400	44,7	4331	4331	400	68,7	2818	espúrio
15	400	45,7	4245	espúrio	400	68,8	2820	2820
16	400	45,1	4278	espúrio	400	68,3	2825	2825
17	400	43,9	4304	4304	400	66,4	2845	2845
18	400	44,9	4303	4303	400	67,9	2845	2845
19	600	44,1	4314	4314	600	123,8	1537	1537
20	600	44,9	4322	4322	600	125,1	1551	1551
21	600	44,4	4351	4351	600	122,6	1576	1576
22	600	43,4	4378	espúrio	600	118,2	1607	espúrio
23	600	45,3	4316	4316	600	129,9	1505	espúrio
24	600	45,2	4261	espúrio	600	123,4	1561	1561
25	800	44,4	4303	4303	800	189,1	1010	1010
26	800	44,8	4301	4301	800	190,4	1012	1012
27	800	45,2	4299	4299	800	200,0	972	espúrio
28	800	45,6	4282	espúrio	800	184,2	1060	espúrio
29	800	45,0	4296	4296	800	196,3	985	985
30	800	45,1	4286	espúrio	800	186,2	1038	1038
31	1000	44,5	4330	4330	1000	211,0	913	espúrio
32	1000	44,5	4318	4318	1000	200,0	961	espúrio
33	1000	44,4	4323	4323	1000	205,0	936	936
34	1000	44,6	4283	espúrio	1000	202,0	946	946
35	1000	44,4	4300	4300	1000	203,0	940	940
36	1000	45,3	4325	4325	1000	207,0	946	946

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE I – Resultados de resistência à compressão

CC

CP	Temperatura °C	CC 1:3,5		CC 1:5		CC 1:6,5	
		Força (kN)	F _{ej} (MPa)	Força (kN)	F _{ej} (MPa)	Força (kN)	F _{ej} (MPa)
1	Ambiente	407,50	51,78	364,50	46,32	250,50	31,89
2		410,00	52,20	370,50	47,08	237,50	29,70
3		388,50	49,47	323,50	41,19	256,50	32,21
4		362,50	45,97	345,50	44,08	254,00	32,17
5		393,50	50,10	361,50	46,03	240,00	30,25
6		430,00	54,86	363,50	46,10	247,50	31,29
7	200°C	350,50	44,63	313,50	39,92	208,00	26,25
8		337,50	43,14	290,50	36,99	201,00	25,51
9		338,00	43,04	285,50	36,42	206,50	25,89
10		334,00	42,53	314,00	39,90	203,00	25,69
11		332,50	42,25	300,50	38,26	195,00	24,69
12		334,00	42,53	313,50	39,76	209,50	26,73
13	400°C	213,00	27,17	242,50	30,81	156,50	19,97
14		241,00	30,56	227,00	28,96	160,50	20,27
15		210,90	26,80	221,00	28,14	162,50	20,69
16		241,50	30,75	235,00	29,86	152,50	19,14
17		224,00	28,52	222,50	28,33	157,00	19,82
18		259,00	32,85	221,00	28,14	158,50	20,02
19	600°C	127,00	16,17	128,00	16,26	94,00	11,79
20		128,50	16,39	122,50	15,57	101,70	12,93
21		147,00	18,72	117,00	14,87	100,00	12,55
22		113,50	14,45	129,00	16,42	73,50	9,26
23		120,00	15,25	130,50	16,65	72,00	9,02
24		120,00	15,28	126,50	16,07	70,00	8,89
25	800°C	82,50	10,50	62,50	7,96	34,50	4,40
26		78,50	9,94	57,00	7,26	32,50	4,10
27		83,00	10,55	72,50	9,23	36,00	4,52
28		67,50	8,59	71,00	9,02	28,50	3,63
29		81,50	10,35	66,00	8,39	30,50	3,83
30		73,50	9,36	78,50	9,99	27,50	3,51
31	1000°C	25,00	3,19	20,00	2,55	10,00	1,29
32		20,00	2,55	23,50	2,99	12,00	1,52
33		19,00	2,42	26,00	3,30	12,50	1,58
34		17,80	2,27	21,50	2,73	11,50	1,46
35		27,50	3,49	16,50	2,10	12,00	1,53
36		24,00	3,05	17,50	2,23	12,00	1,53

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA

CP	Temperatura °C	CAA VMA 1:3,5		CAA VMA 1:5		CAA VMA 1:6,5	
		Força (kN)	F _{ej} (MPa)	Força (kN)	F _{ej} (MPa)	Força (kN)	F _{ej} (MPa)
1	Ambiente	420,50	53,43	311,50	39,45	243,50	30,84
2		416,50	52,11	306,00	38,96	234,50	29,55
3		419,50	52,85	290,00	37,00	256,00	32,25
4		426,50	53,66	317,50	39,78	241,50	30,49
5		394,50	49,78	323,00	40,60	241,50	30,36
6		409,00	50,75	307,50	38,93	232,00	29,13
7	200°C	320,50	40,06	273,00	34,52	205,00	25,88
8		355,00	44,33	269,00	34,60	201,50	25,30
9		381,50	48,22	267,00	33,79	224,00	28,21
10		338,00	42,67	278,00	35,68	219,50	27,89
11		334,00	42,23	253,50	32,28	226,00	28,54
12		321,00	40,71	274,00	34,96	209,00	26,30
13	400°C	270,00	34,25	188,00	23,98	183,50	23,17
14		274,50	34,68	211,50	26,70	167,50	21,14
15		287,50	36,26	184,00	23,54	174,00	21,85
16		268,00	33,46	185,00	23,50	170,00	21,49
17		276,00	34,76	183,50	23,17	176,00	22,24
18		260,50	32,76	173,50	21,67	182,50	22,96
19	600°C	180,00	22,51	104,50	13,11	91,00	11,50
20		175,50	21,84	96,00	12,08	94,00	11,89
21		176,50	22,17	99,50	12,57	93,00	11,70
22		178,00	22,37	102,00	12,89	91,00	11,50
23		169,50	21,26	104,00	13,19	83,50	10,60
24		173,00	21,84	97,00	12,20	85,00	10,72
25	800°C	82,50	10,35	49,00	6,14	41,50	5,25
26		86,50	10,86	47,00	5,95	38,00	4,81
27		85,50	10,56	51,60	6,54	43,00	5,43
28		90,00	11,24	52,00	6,59	38,00	4,82
29		89,00	11,09	49,50	6,20	41,00	5,19
30		90,50	11,33	57,00	7,17	40,00	5,06
31	1000°C	35,50	4,43	25,50	3,21	17,00	2,14
32		34,50	4,34	21,50	2,72	16,00	2,02
33		38,00	4,77	25,00	3,14	17,50	2,21
34		35,50	4,49	21,00	2,64	17,50	2,21
35		36,50	4,61	23,50	2,97	16,50	2,08
36		35,50	4,44	25,10	3,17	16,00	2,03

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP

CP	Temperatura °C	CAA VMA 1:3,5		CAA VMA 1:5		CAA VMA 1:6,5	
		Força (kN)	F _{ej} (MPa)	Força (kN)	F _{ej} (MPa)	Força (kN)	F _{ej} (MPa)
1	Ambiente	452,00	57,67	309,50	39,20	233,50	29,42
2		466,50	59,08	334,50	42,25	237,00	29,80
3		457,50	58,37	336,00	42,49	236,00	29,76
4		427,50	54,06	350,50	44,35	232,00	29,42
5		402,50	51,15	337,00	42,60	235,00	29,54
6		468,50	59,65	337,00	42,91	252,50	31,82
7	200°C	378,50	47,76	297,50	37,59	225,00	28,39
8		392,00	49,75	330,50	42,00	222,00	27,88
9		364,00	46,35	314,50	39,84	220,00	27,74
10		387,00	49,27	305,00	38,63	221,50	28,20
11		362,50	46,06	295,50	37,27	231,00	29,41
12		409,00	52,08	283,50	35,91	219,50	27,65
13	400°C	310,00	39,39	238,50	30,37	180,50	22,83
14		291,00	36,69	247,50	31,31	184,50	23,32
15		321,50	40,85	252,00	31,80	177,00	22,54
16		286,50	36,41	231,00	29,19	174,00	22,03
17		293,50	37,16	251,50	31,73	179,50	22,60
18		274,00	34,89	250,50	31,96	176,00	22,34
19	600°C	148,00	18,77	112,50	14,25	113,00	14,28
20		157,50	20,05	118,50	14,99	107,00	13,53
21		157,50	20,05	119,50	15,09	112,50	14,22
22		159,50	20,31	106,00	13,40	106,00	13,39
23		149,50	18,89	112,00	14,16	110,00	13,98
24		155,00	19,70	100,50	12,70	118,50	15,00
25	800°C	89,50	11,37	63,00	7,96	44,00	5,57
26		85,22	10,85	62,00	7,86	41,00	5,20
27		83,50	10,65	61,50	7,83	46,00	5,85
28		83,50	10,55	61,00	7,75	44,50	5,65
29		85,50	10,78	67,00	8,48	45,00	5,69
30		88,50	11,25	57,50	7,27	45,00	5,71
31	1000°C	32,50	4,14	23,50	3,00	18,00	2,28
32		32,50	4,08	22,50	2,86	17,00	2,15
33		32,50	4,14	24,00	3,06	17,00	2,15
34		33,50	4,27	26,00	3,29	16,50	2,09
35		33,50	4,26	24,00	3,04	16,50	2,08
36		33,50	4,24	24,00	3,05	16,00	2,03

(fonte: elaborado pelo autor)

APÊNDICE J – Dados módulo de elasticidade

CC 1:3,5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	51,78	-	-	-
	2	52,20	-	-	-
	3	49,47	-	-	-
	4	45,97	31,367	31,367	31,518
	5	50,10	31,661	31,661	
	6	54,86	31,528	31,528	
200°C	7	44,63	-	-	-
	8	43,14	-	-	-
	9	43,04	-	-	-
	10	42,53	22,031	22,031	21,472
	11	42,25	20,764	20,764	
	12	42,53	21,620	21,620	
400°C	13	27,17	-	-	-
	14	30,56	-	-	-
	15	26,80	-	-	-
	16	30,75	11,713	11,713	11,683
	17	28,52	11,749	11,749	
	18	32,85	11,586	11,586	
600°C	19	16,17	-	-	-
	20	16,39	-	-	-
	21	18,72	-	-	-
	22	14,45	4,494	4,494	4,045
	23	15,25	3,632	3,632	
	24	15,28	4,010	4,010	
800°C	25	10,50	-	-	-
	26	9,94	-	-	-
	27	10,55	-	-	-
	28	8,59	2,457	2,457	3,303
	29	10,35	3,669	3,669	
	30	9,36	3,784	3,784	
1000°C	31	3,19	-	-	-
	32	2,55	-	-	-
	33	2,42	-	-	-
	34	2,27	2,593	2,593	2,446
	35	3,49	2,477	espúrio (resistência)	
	36	3,05	2,299	2,299	

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	46,32	-	-	-
	2	47,08	-	-	-
	3	41,19	-	-	-
	4	44,08	27,778	27,778	28,229
	5	46,03	28,584	28,584	
	6	46,10	28,325	28,325	
200°C	7	39,92	-	-	-
	8	36,99	-	-	-
	9	36,42	-	-	-
	10	39,90	20,345	20,345	20,078
	11	38,26	19,415	19,415	
	12	39,76	20,472	20,472	
400°C	13	30,81	-	-	-
	14	28,96	-	-	-
	15	28,14	-	-	-
	16	29,86	11,954	11,954	11,828
	17	28,33	11,702	11,702	
	18	28,14	10,100	espúrio (módulo)	
600°C	19	16,26	-	-	-
	20	15,57	-	-	-
	21	14,87	-	-	-
	22	16,42	3,978	3,978	4,542
	23	16,65	4,703	4,703	
	24	16,07	4,945	4,945	
800°C	25	7,96	-	-	-
	26	7,26	-	-	-
	27	9,23	-	-	-
	28	9,02	2,820	espúrio (módulo)	3,325
	29	8,39	3,325	3,325	
	30	9,99	3,328	espúrio (resistência)	
1000°C	31	2,55	-	-	-
	32	2,99	-	-	-
	33	3,30	-	-	-
	34	2,73	2,491	2,491	2,491
	35	2,10	2,307	espúrio (resistência)	
	36	2,23	2,638	espúrio (resistência)	

(fonte: elaborado pelo autor)

CC 1:6,5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	31,89	-	-	-
	2	29,70	-	-	-
	3	32,21	-	-	-
	4	32,17	26,497	26,497	26,821
	5	30,25	27,983	27,983	
	6	31,29	25,983	25,983	
200°C	7	26,25	-	-	-
	8	25,51	-	-	-
	9	25,89	-	-	-
	10	25,69	18,046	18,046	17,918
	11	24,69	17,790	17,790	
	12	26,73	19,524	espúrio (módulo)	
400°C	13	19,97	-	-	-
	14	20,27	-	-	-
	15	20,69	-	-	-
	16	19,14	12,556	espúrio (módulo)	10,930
	17	19,82	11,062	11,062	
	18	20,02	10,799	10,799	
600°C	19	11,79	-	-	-
	20	12,93	-	-	-
	21	12,55	-	-	-
	22	9,26	2,849	espúrio (resistência)	2,849
	23	9,02	2,836	espúrio (resistência)	2,836
	24	9,89	2,856	espúrio (resistência)	2,856
800°C	25	4,40	-	-	-
	26	4,10	-	-	-
	27	4,52	-	-	-
	28	3,63	2,004	2,004	2,039
	29	3,83	2,091	2,091	
	30	3,51	2,021	2,021	
1000°C	31	1,29	-	-	-
	32	1,52	-	-	-
	33	1,58	-	-	-
	34	1,46	0,658	0,658	0,638
	35	1,53	0,617	0,617	
	36	1,53	0,711	espúrio (módulo)	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:3,5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	53,43	-	-	-
	2	52,11	-	-	-
	3	52,85	-	-	-
	4	53,66	30,636	30,636	31,520
	5	49,78	31,355	31,355	
	6	50,75	32,569	32,569	
200°C	7	40,06	-	-	-
	8	44,33	-	-	-
	9	48,22	-	-	-
	10	42,67	20,937	20,937	21,984
	11	42,23	22,037	22,037	
	12	40,71	22,978	22,978	
400°C	13	34,25	-	-	-
	14	34,68	-	-	-
	15	36,26	-	-	-
	16	33,46	13,637	13,637	13,581
	17	34,76	13,466	13,466	
	18	32,76	13,640	13,640	
600°C	19	22,51	-	-	-
	20	21,84	-	-	-
	21	22,17	-	-	-
	22	22,37	6,684	0,000	6,777
	23	21,26	6,911	0,000	
	24	21,84	6,734	0,000	
800°C	25	10,35	-	-	-
	26	10,86	-	-	-
	27	10,56	-	-	-
	28	11,24	3,793	3,793	3,871
	29	11,09	3,952	3,952	
	30	11,33	3,867	3,867	
1000°C	31	4,43	-	-	-
	32	4,34	-	-	-
	33	4,77	-	-	-
	34	4,49	2,648	2,648	2,689
	35	4,61	2,789	2,789	
	36	4,44	2,630	2,630	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	39,45	-	-	-
	2	38,96	-	-	-
	3	37,00	-	-	-
	4	39,78	28,111	28,111	28,853
	5	40,60	29,314	29,314	
	6	38,93	29,135	29,135	
200°C	7	34,52	-	-	-
	8	34,60	-	-	-
	9	33,79	-	-	-
	10	35,68	21,002	21,002	21,291
	11	32,28	21,818	21,818	
	12	34,96	21,054	21,054	
400°C	13	23,98	-	-	-
	14	26,70	-	-	-
	15	23,54	-	-	-
	16	23,50	11,967	11,967	11,884
	17	23,17	11,595	11,595	
	18	21,67	12,089	12,089	
600°C	19	13,11	-	-	-
	20	12,08	-	-	-
	21	12,57	-	-	-
	22	12,89	3,609	0,000	3,474
	23	13,19	3,416	0,000	
	24	12,20	3,397	0,000	
800°C	25	6,14	-	-	-
	26	5,95	-	-	-
	27	6,54	-	-	-
	28	6,59	2,096	2,096	2,076
	29	6,20	2,082	2,082	
	30	7,17	2,049	2,049	
1000°C	31	3,21	-	-	-
	32	2,72	-	-	-
	33	3,14	-	-	-
	34	2,64	2,387	2,387	2,300
	35	2,97	2,596	espúrio (módulo)	
	36	3,17	2,213	2,213	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA VMA 1:6,5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	30,97	-	-	-
	2	29,84	-	-	-
	3	32,57	-	-	-
	4	30,74	23,332	23,332	23,729
	5	30,76	24,127	24,127	
	6	29,54	21,684	espúrio (módulo)	
200°C	7	26,09	-	-	-
	8	25,68	-	-	-
	9	28,53	-	-	-
	10	27,94	16,969	16,969	17,026
	11	28,74	17,307	17,307	
	12	26,62	16,802	16,802	
400°C	13	23,38	-	-	-
	14	21,31	-	-	-
	15	22,12	-	-	-
	16	21,62	10,242	10,242	10,257
	17	22,41	10,402	10,402	
	18	23,23	10,128	10,128	
600°C	19	11,61	-	-	-
	20	11,94	-	-	-
	21	11,85	-	-	-
	22	11,57	2,976	2,976	2,897
	23	10,61	2,861	2,861	
	24	10,84	2,854	2,854	
800°C	25	5,26	-	-	-
	26	4,81	-	-	-
	27	5,49	-	-	-
	28	4,85	2,119	2,119	2,152
	29	5,21	2,217	2,217	
	30	5,06	2,121	2,121	
1000°C	31	2,14	-	-	-
	32	2,05	-	-	-
	33	2,24	-	-	-
	34	2,24	2,266	2,266	2,206
	35	2,10	2,147	2,147	
	36	2,05	1,829	espúrio (módulo)	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:3,5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	57,67	-	-	-
	2	59,08	-	-	-
	3	58,37	-	-	-
	4	54,06	31,462	31,462	32,283
	5	51,15	32,368	32,368	
	6	59,65	33,020	33,020	
200°C	7	47,76	-	-	-
	8	49,75	-	-	-
	9	46,35	-	-	-
	10	49,27	22,511	espúrio (módulo)	24,396
	11	46,06	23,832	23,832	
	12	52,08	24,961	24,961	
400°C	13	39,39	-	-	-
	14	36,69	-	-	-
	15	40,85	-	-	-
	16	36,41	13,789	13,789	13,741
	17	37,16	14,016	14,016	
	18	34,89	13,418	13,418	
600°C	19	18,77	-	-	-
	20	20,05	-	-	-
	21	20,05	-	-	-
	22	20,31	6,054	6,054	5,848
	23	18,89	5,560	5,560	
	24	19,70	5,930	5,930	
800°C	25	11,37	-	-	-
	26	10,85	-	-	-
	27	10,65	-	-	-
	28	10,55	4,262	4,262	4,148
	29	10,78	3,993	3,993	
	30	11,25	4,190	4,190	
1000°C	31	4,14	-	-	-
	32	4,08	-	-	-
	33	4,14	-	-	-
	34	4,27	2,740	2,740	2,763
	35	4,26	2,870	2,870	
	36	4,24	2,678	2,678	

(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:5

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	39,20	-	-	-
	2	42,25	-	-	-
	3	42,49	-	-	-
	4	44,35	27,140	27,140	26,675
	5	42,60	26,209	26,209	
	6	42,91	29,180	espúrio (módulo)	
200°C	7	37,59	-	-	-
	8	42,00	-	-	-
	9	39,84	-	-	-
	10	38,63	20,937	0,000	20,599
	11	37,27	20,306	20,306	
	12	35,91	20,556	20,556	
400°C	13	30,37	-	-	-
	14	31,31	-	-	-
	15	31,80	-	-	-
	16	29,19	12,035	12,035	12,195
	17	31,73	12,338	12,338	
	18	31,96	12,214	12,214	
600°C	19	14,25	-	-	-
	20	14,99	-	-	-
	21	15,09	-	-	-
	22	13,40	3,292	3,292	3,341
	23	14,16	3,460	3,460	
	24	12,70	3,271	3,271	
800°C	25	7,96	-	-	-
	26	7,86	-	-	-
	27	7,83	-	-	-
	28	7,75	2,700	espúrio (módulo)	3,005
	29	8,48	3,057	3,057	
	30	7,27	2,954	2,954	
1000°C	31	3,00	-	-	-
	32	2,86	-	-	-
	33	3,06	-	-	-
	34	3,29	2,286	2,286	2,320
	35	3,04	1,956	espúrio (módulo)	
	36	3,05	2,355	2,355	

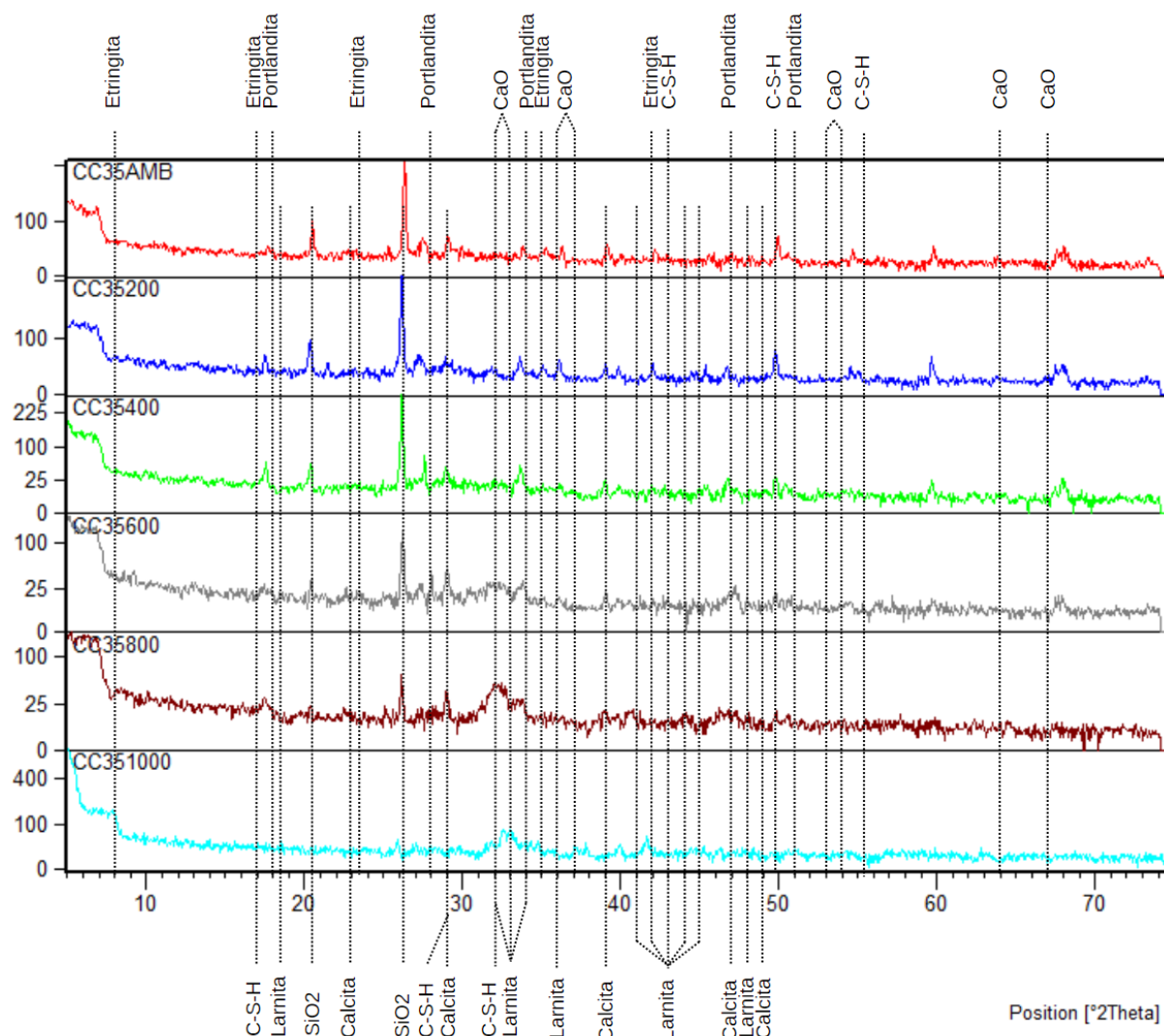
(fonte: elaborado pelo autor)

CAA NP 1:6,5

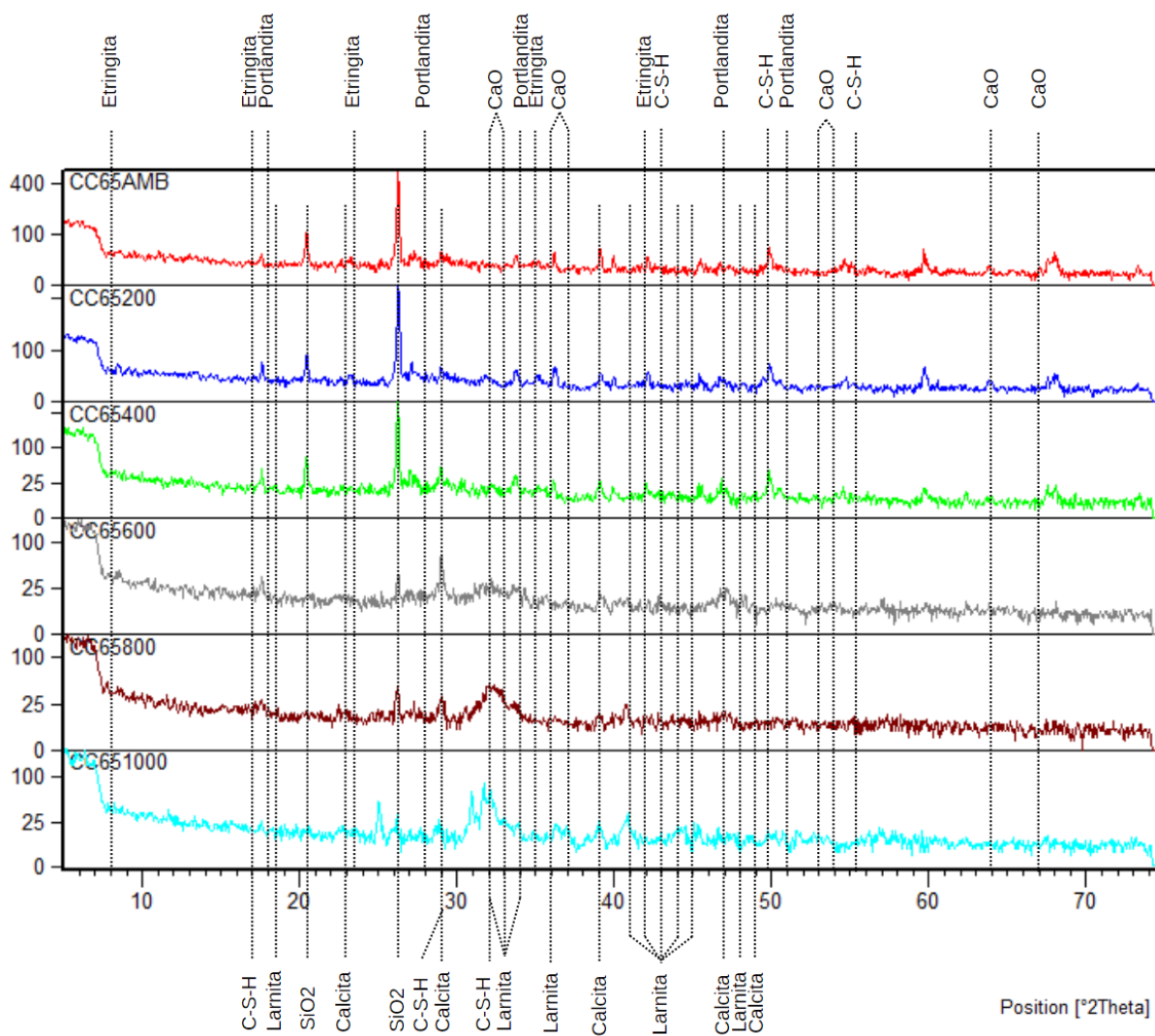
Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Coletado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (GPa)
Ambiente	1	29,42	-	-	-
	2	29,80	-	-	-
	3	29,76	-	-	-
	4	29,42	25,813	25,813	25,682
	5	29,54	23,161	espúrio (módulo)	
	6	31,82	25,551	25,551	
200°C	7	28,39	-	-	-
	8	27,88	-	-	-
	9	27,74	-	-	-
	10	28,20	18,289	18,289	18,176
	11	29,41	17,547	17,547	
	12	27,65	18,693	18,693	
400°C	13	22,83	-	-	-
	14	23,32	-	-	-
	15	22,54	-	-	-
	16	22,03	10,897	10,897	10,809
	17	22,60	10,747	10,747	
	18	22,34	10,782	10,782	
600°C	19	14,28	-	-	-
	20	13,53	-	-	-
	21	14,22	-	-	-
	22	13,39	4,493	4,493	4,400
	23	13,98	4,215	4,215	
	24	15,00	4,491	4,491	
800°C	25	5,57	-	-	-
	26	5,20	-	-	-
	27	5,85	-	-	-
	28	5,65	2,756	espúrio (módulo)	2,460
	29	5,69	2,424	2,424	
	30	5,71	2,496	2,496	
1000°C	31	2,28	-	-	-
	32	2,15	-	-	-
	33	2,15	-	-	-
	34	2,09	1,890	espúrio (módulo)	2,419
	35	2,08	2,373	2,373	
	36	2,03	2,464	2,464	

(fonte: elaborado pelo autor)

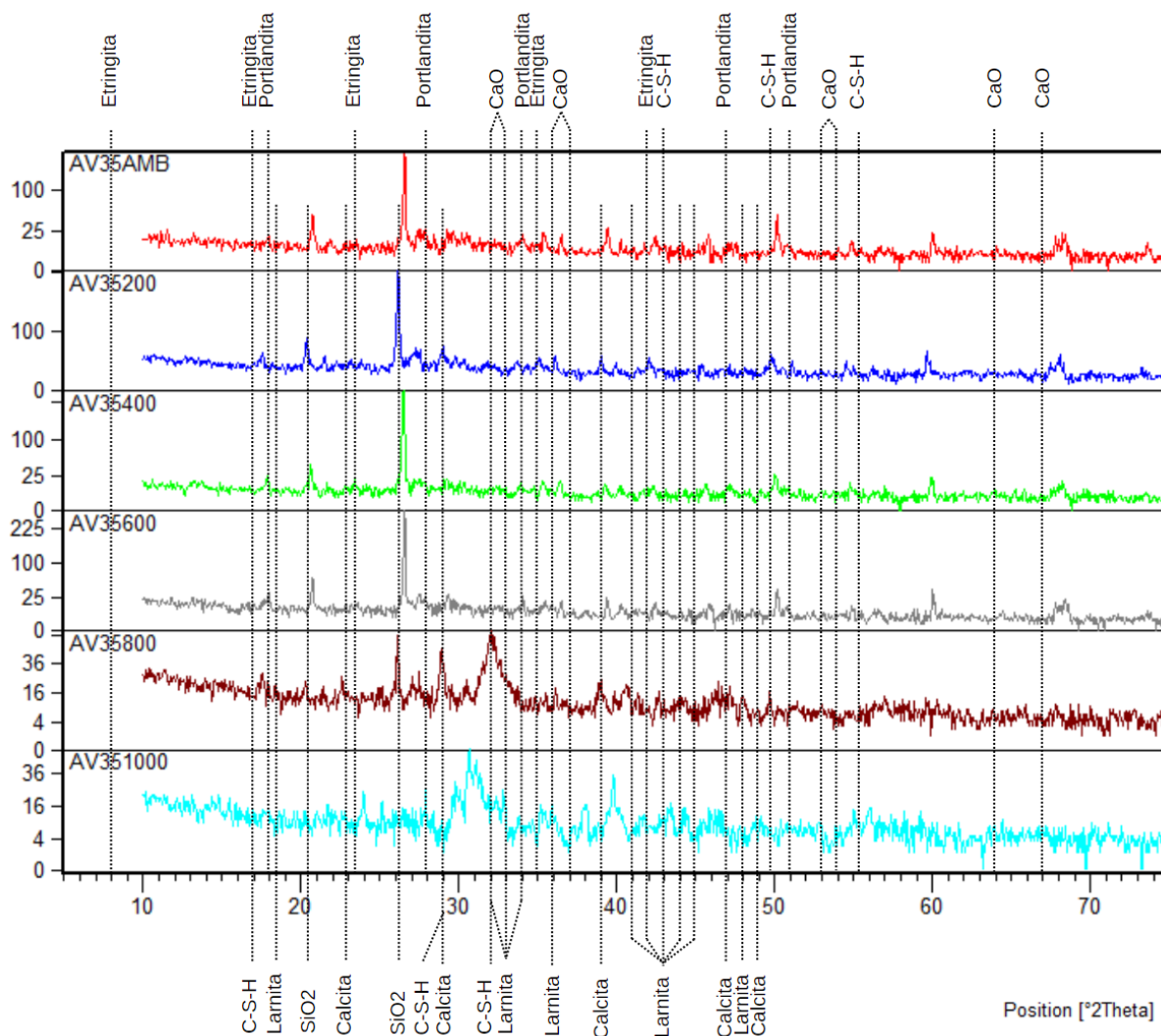
APÊNDICE K – Difractogramas dos traços 1:3,5 e 1:6,5



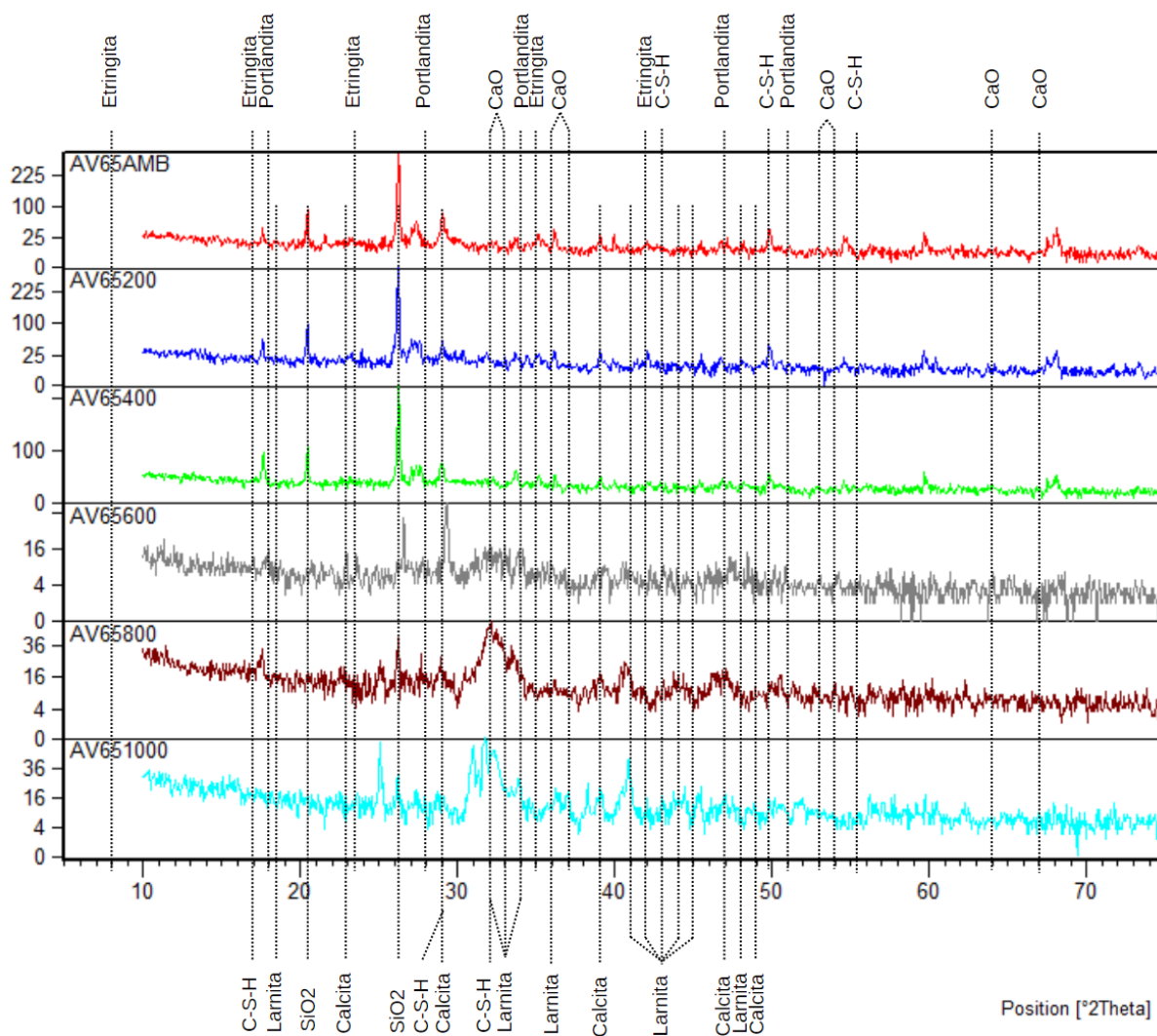
(fonte: elaborado pelo autor)



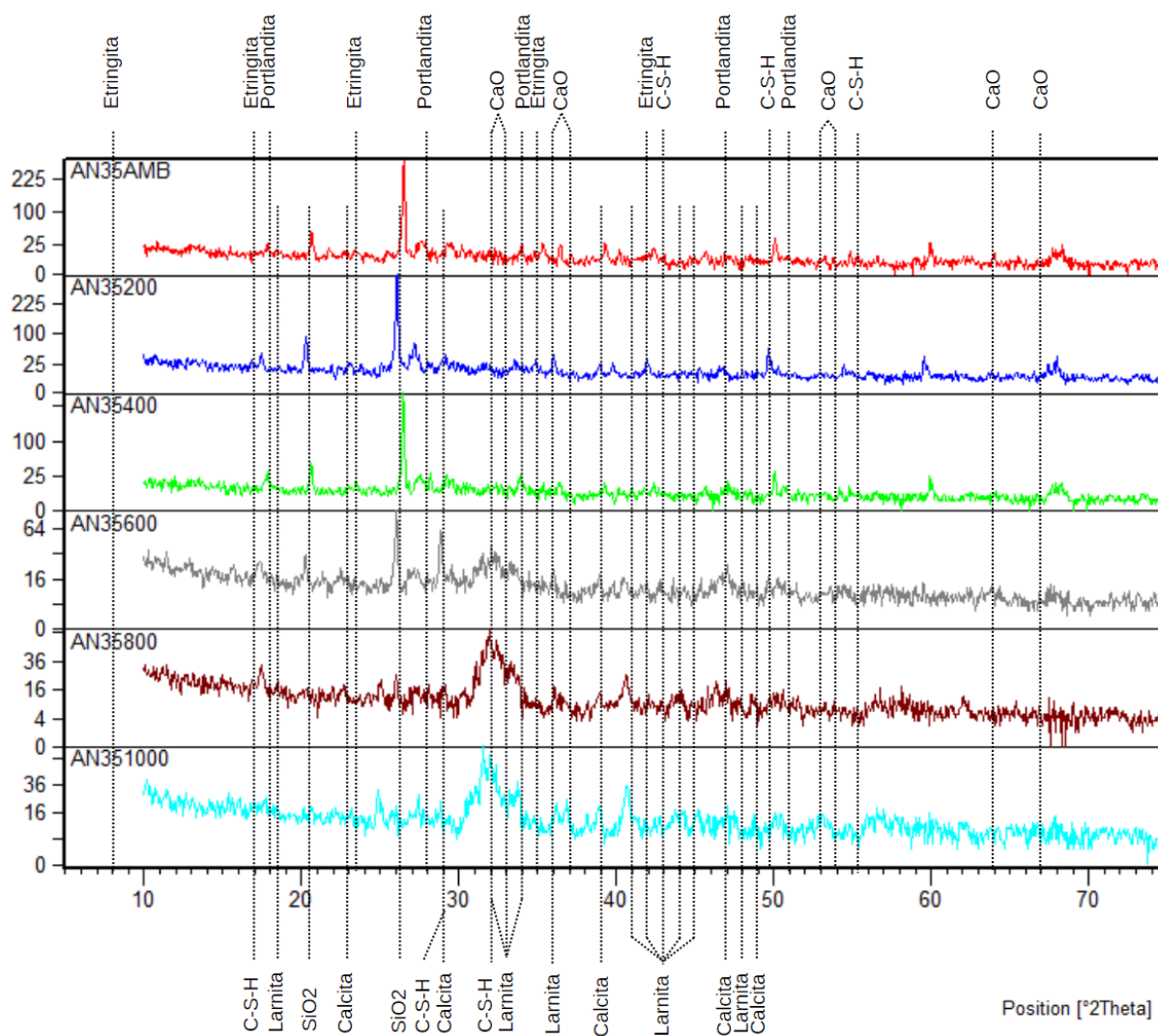
(fonte: elaborado pelo autor)



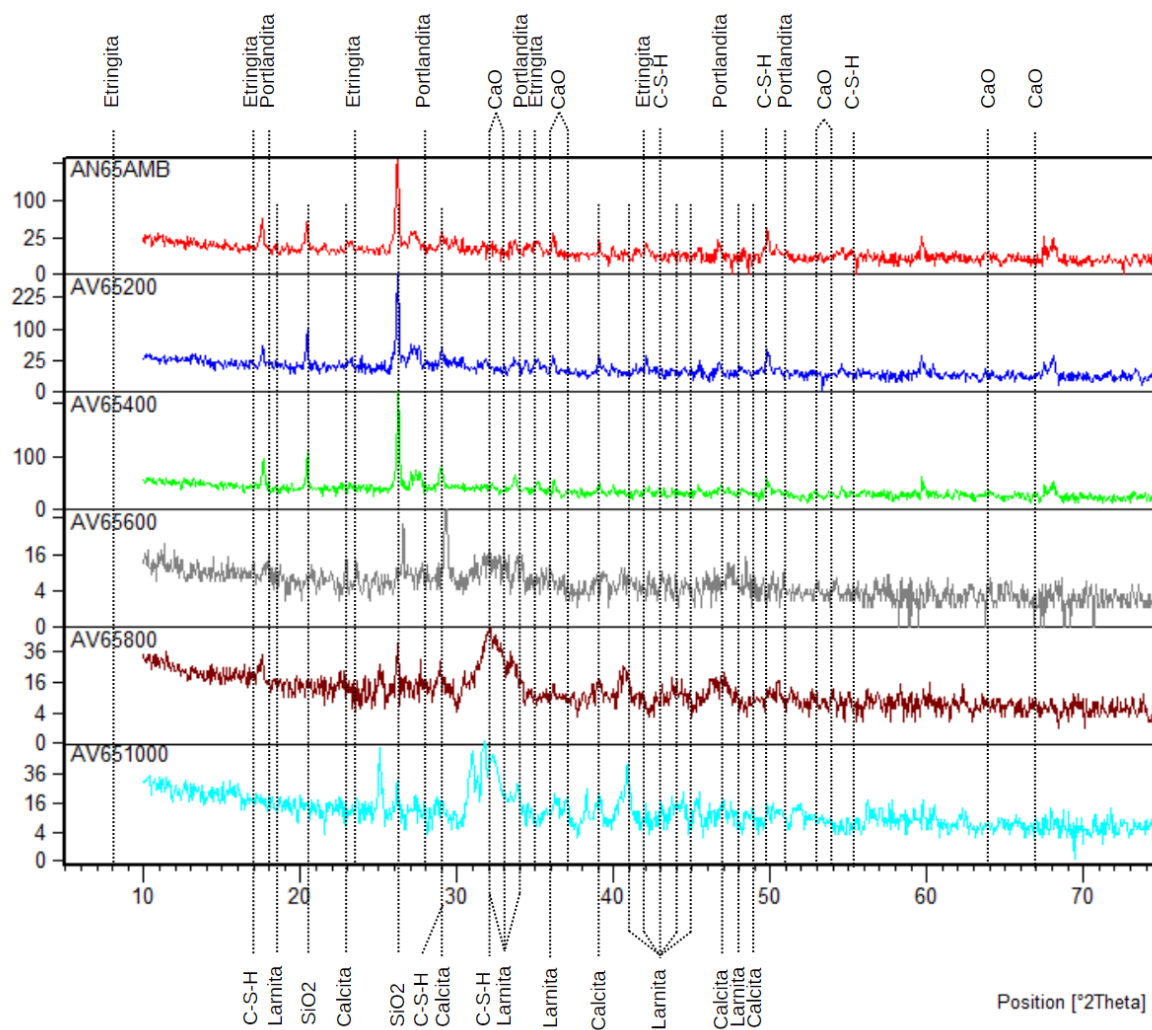
(fonte: elaborado pelo autor)



(fonte: elaborado pelo autor)



(fonte: elaborado pelo autor)



(fonte: elaborado pelo autor)