



**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura**

**Ana Júlia Smolinski Gouveia**

**Influência da utilização de *filler* de resíduo de cerâmica vermelha  
em concreto autoadensável exposto a elevadas temperaturas**

Porto Alegre  
2023

ANA JÚLIA SMOLINSKI GOUVEIA

**INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE *FILLER* DE RESÍDUO DE  
CERÂMICA VERMELHA EM CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL EXPOSTO A ELEVADAS  
TEMPERATURAS**

Dissertação de Mestrado 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 Civil

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ângela Gaio Graeff**  
PhD, Universidade de Sheffield, Inglaterra  
Orientadora

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mônica Regina Garcez**  
Doutora, UFRGS, Brasil  
Orientadora

Porto Alegre  
2023

ANA JÚLIA SMOLINSKI GOUVEIA

**INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE *FILLER* DE RESÍDUO DE  
CERÂMICA VERMELHA EM CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL EXPOSTO A ELEVADAS  
TEMPERATURAS**

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Desempenho e Patologia, e aprovada em sua forma final pelos Professores Orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de novembro de 2023.

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ângela Gaio Graeff**  
PhD, Universidade de Sheffield, Inglaterra  
Orientadora

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mônica Regina Garcez**  
Doutora, UFRGS, Brasil  
Orientadora

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Carolina Badalotti Passuelo**  
Coordenadora PPGCI/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho (UFRGS)**  
PhD, University of Leeds, Inglaterra

**Prof. Jacinto Manuel Antunes de Almeida (PUCRS)**  
Doutor, UFRGS, Brasil

**Prof. Rogério Cattelan Antochaves de Lima (UFSM)**  
Doutor, UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho ao meu avô Eduardo Smolinski, que  
compartilhou comigo o amor pela engenharia.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar perseverança nos momentos mais desafiadores desse trabalho.

Agradeço ao meu marido, Anderson, por ser a minha base e o melhor companheiro que eu poderia ter durante essa trajetória. Obrigada por me lembrar continuamente de que sou capaz de realizar os meus sonhos.

Agradeço aos meus pais, Paulo e Denise, por me orientarem e me incentivarem em cada decisão, por nunca medirem esforços para que eu pudesse estudar.

Agradeço ao meu irmão, Filipe, por ser os ouvidos dos meus desabafos e meu companheiro nos momentos de descontração. À minha avó, Isabel, por ser cuidado em dias estressantes. À Susi por ser minha companheira de todas as horas e por compartilhar tanta alegria.

Às minhas orientadoras Ângela Gaio Graeff e Mônica Regina Garcez. Agradeço pela sinergia, pela paciência e por todo o conhecimento compartilhado. Vocês, sem dúvida, são fonte de inspiração para a minha carreira.

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

Agradeço ao Lucas Alexandre Reginato e ao Alessandro Simas Franchetto pelo conhecimento compartilhado e pelo auxílio durante a concretagem e realização dos ensaios.

Agradeço ao Edgar Wallace Pereira, ao José Orvandır, à Gabriela Griggio, à Julia Helena e a toda família LEME por todo o apoio laboratorial.

Agradeço às empresas que doaram os materiais para a realização da pesquisa: GCP Applied Technologies, Pauluzzi Blocos Cerâmicos e Pedreira Vila Rica. Agradeço também ao Cleber de Freitas Miranda pelo auxílio na busca pelos resíduos de cerâmica vermelha.

Agradeço ao PPGCI pela oportunidade de adquirir conhecimento de qualidade através da pesquisa.

“Que nada nos limite, que nada nos defina, que nada nos  
sujeite. Que a liberdade seja a nossa própria substância.”

*(Simone de Beauvoir)*

## RESUMO

GOUVEIA, A. J. S. **Influência da utilização de *filler* de resíduo de cerâmica vermelha em concreto autoadensável exposto a elevadas temperaturas**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

O concreto autoadensável (CAA) é um material cimentício com capacidade de fluir e preencher completamente todos os espaços das fôrmas pela ação de seu peso próprio, dispensando a necessidade de vibração ou outras influências externas. Contudo, para alcançar tais características, esse concreto geralmente é dosado com um maior teor de materiais finos e/ou com aditivo modificador de viscosidade. Entretanto, maiores quantidades de *filler* no CAA reduzem a porosidade, tornando-o mais vulnerável à deterioração em elevadas temperaturas e mais suscetível ao *spalling*. Portanto, considerando suas propriedades frescas e endurecidas, os materiais utilizados e sua importância na indústria da construção, compreender o comportamento do CAA após exposição a elevadas temperaturas é de suma importância. Além disso, acredita-se que o resíduo de cerâmica vermelha (RCV) pode ter grande potencial ao ser utilizado como *filler* no CAA em elevadas temperaturas, devido à sua porosidade e pozolanicidade inerentes, unido à oportunidade de oferecer uma destinação nobre para esse resíduo, que tem baixa demanda no mercado. Dessa forma, este trabalho apresenta os resultados experimentais sobre resistência residual e comportamento de deterioração após exposição a elevadas temperaturas de concreto autoadensável produzido com *filler* de resíduo proveniente da indústria de cerâmica vermelha. Foram produzidas três misturas: concreto convencional, concreto autoadensável com *filler* não pozolânico e concreto autoadensável com *filler* de resíduo de cerâmica vermelha. Foram investigadas propriedades no estado fresco (espalhamento e tempo de escoamento) e no estado endurecido (absorção por capilaridade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, fissuração, *spalling*, mudança de cor, perda de massa e velocidade de pulso ultrassônico nos corpos de prova). As propriedades residuais dos concretos foram determinadas após aquecimento a quatro temperaturas (200, 400, 600 e 800°C), com taxa de aquecimento de 1 °C/min. Os resultados confirmam que o uso do resíduo de cerâmica vermelha provoca uma melhora na resistência à compressão em relação aos outros concretos estudados, após exposição a elevadas temperaturas e diminui a ocorrência de *spalling*, no entanto resulta em uma maior absorção por capilaridade. A velocidade de pulso ultrassônico indicou um comportamento semelhante do CAA-RCV ao do CAA. Ademais, todas as famílias de concreto indicaram degradação das propriedades residuais conforme a elevação da temperatura.

**Palavras-chave:** Concreto autoadensável. Resíduo de cerâmica vermelha. Elevadas temperaturas. Propriedades residuais.

## ABSTRACT

GOUVEIA, A. J. S. **Influence of the use of clay brick waste filler in self-compacting concrete exposed to elevated temperatures.** 2023. Dissertation (Master in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

Self-compacting concrete (SCC) is a cementitious material with the ability to flow and completely fill all spaces in the formwork due to the action of its own weight, eliminating the need for vibration or other external influences. However, to achieve such characteristics, this concrete is generally dosed with a higher content of fine materials and/or a viscosity modifying additive. However, greater amounts of filler in CAA reduce porosity, making it more vulnerable to deterioration at elevated temperatures and more susceptible to spalling. Therefore, considering its fresh and hardened properties, the materials used and its importance in the construction industry, understanding the behavior of SCC after exposure to elevated temperatures is of paramount importance. Furthermore, it is believed that clay brick waste (CBW) has great potential when used as a filler in SCC at elevated temperatures, due to its inherent porosity and pozzolanicity, combined with the opportunity to offer a noble destination for this waste, which has low demand in the market. Therefore, this work presents experimental results on residual strength and deterioration behavior after exposure to elevated temperatures of self-compacting concrete produced with waste filler from the red ceramic industry. Three mixtures were produced: conventional concrete, self-compacting concrete with non-pozzolanic filler and self-compacting concrete with clay brick waste filler. Properties were investigated in the fresh state (slump flow and slump flow time) and in the hardened state (absorption by capillarity, compressive strength, modulus of elasticity, cracking, spalling, color change, mass loss and ultrasonic pulse speed in the specimens). The residual properties of the concretes were determined after heating at four temperatures (200, 400, 600 and 800°C), with a heating rate of 1°C/min. The results confirm that the use of clay brick waste causes an improvement in compressive strength in relation to other concretes studied, after exposure to elevated temperatures and reduces the occurrence of spalling, however it results in greater absorption by capillarity. The ultrasonic pulse speed indicated a similar behavior of CAA-RCV to that of CAA. Furthermore, all concrete families indicated degradation of residual properties as the temperature increased.

**Keywords:** Self-compacting concrete. Clay brick waste. Elevated temperatures. Residual properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Porosidade dos corpos de prova conforme porcentagem de cinzas volantes adicionadas na mistura.....	25
Figura 2 – Compressão residual do CAA em função da temperatura .....	26
Figura 3 – Comportamento dos agregados durante aquecimento.....	28
Figura 4 – Curvas de resistência à compressão normalizada em função da temperatura.....	30
Figura 5 – Influência do <i>filler</i> de RCV na trabalhabilidade do CAA.....	34
Figura 6 – Organograma do Programa Experimental.....	37
Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo .....	42
Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	43
Figura 9 – Distribuição granulométrica do <i>filler</i> de areia .....	45
Figura 10 – RCV coletado na fábrica .....	46
Figura 11 – Composição granulométrica do RCV peneirado #0,6mm .....	47
Figura 12 – Comparação das diferentes composições granulométricas do RCV.....	48
Figura 13 – Aspecto do RCV .....	49
Figura 14 – IAP do RCV .....	51
Figura 15 – Forno elétrico industrial utilizado na pesquisa.....	60
Figura 16 – Curvas de aquecimento para cada patamar .....	61
Figura 17 – Resistência potencial à compressão para o traço 1:3,5 na etapa de dosagem.....	67
Figura 18 – Resistência potencial à compressão para o traço 1:5 na etapa de dosagem.....	68
Figura 19 – Resistência potencial à compressão para o traço 1:6,5 na etapa de dosagem.....	68
Figura 20 – Diagrama de dosagem do CC.....	69
Figura 21 – Diagrama de dosagem do CAA .....	70
Figura 22 – Diagrama de dosagem do CAA-RCV .....	70
Figura 23 – Comparativo de resistência à compressão aos 63 dias.....	72
Figura 24 – Registros fotográficos dos concretos autoadensáveis no estado fresco .....	74
Figura 25 – Índice de absorção de água por capilaridade dos concretos.....	76
Figura 26 – Densidade média em função da idade.....	78
Figura 27 – Variação de massa em função do patamar de temperatura .....	79
Figura 28 – Comparativo da análise de VPU para cada patamar de temperatura .....	81
Figura 29 – Resistência média à compressão para cada patamar de temperatura .....	82
Figura 30 – Fatores de redução de resistência em função da temperatura .....	83
Figura 31 – Correlação entre resistência à compressão e VPU normalizados .....	84
Figura 32 – Módulo de elasticidade médio em função da temperatura.....	88
Figura 33 – Módulo de elasticidade normalizado em função da temperatura.....	89
Figura 34 – Correlação – Módulo de elasticidade X Resistência à compressão.....	90
Figura 35 – CC após exposição a elevadas temperaturas.....	94
Figura 36 – CAA após exposição a elevadas temperaturas.....	94
Figura 37 – CAA-RCV após exposição a elevadas temperaturas .....	94
Figura 38 – Análise de <i>spalling</i> do CC .....	95
Figura 39 – Análise de <i>spalling</i> do CAA .....	95
Figura 40 – Análise de <i>spalling</i> do CAA-RCV.....	96

Figura 41 – Fissuras no CC após elevada taxa de aquecimento.....	97
Figura 42 – Custo do concreto por m <sup>3</sup> .....	99
Figura 43 – Consumo de cimento em função da resistência à compressão.....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos sobre CAA em elevadas temperaturas .....	20
Tabela 2 – Estudos sobre agregado de RCV .....	31
Tabela 3 – Fatores controláveis e níveis para a etapa de dosagem.....	38
Tabela 4 – Fatores controláveis e níveis para a pesquisa .....	39
Tabela 5 – Ensaio químicos – Votorantim Cimentos .....	40
Tabela 6 – Ensaio físicos – Votorantim Cimentos.....	40
Tabela 7 – Ensaio mecânicos – Votorantim Cimentos .....	41
Tabela 8 – Densidade e absorção de água do agregado graúdo .....	41
Tabela 9 – Composição granulométrica do agregado graúdo .....	41
Tabela 10 – Densidade e absorção de água do agregado miúdo .....	42
Tabela 11 – Composição granulométrica do agregado miúdo .....	43
Tabela 12 – Densidade e absorção de água do <i>filler</i> de areia.....	44
Tabela 13 – Composição granulométrica do <i>filler</i> de areia.....	44
Tabela 14 – Caracterização física do RCV.....	49
Tabela 15 – IAP do RCV.....	50
Tabela 16 – Caracterização do aditivo superplastificante .....	51
Tabela 17 – Proporção dos concretos para o estudo de dosagem.....	52
Tabela 18 – Dosagem do traço intermediário seco em massa do CC.....	53
Tabela 19 – Limites de resultados para o slump flow test.....	55
Tabela 20 – Qualidade do concreto em função da VPU.....	58
Tabela 21 – Equipamento de ultrassom para o ensaio de VPU.....	58
Tabela 22 – Parâmetros do sistema do ensaio de VPU .....	59
Tabela 23 – Outras informações do ensaio de VPU .....	59
Tabela 24 – Tempo de homogeneização das temperaturas .....	60
Tabela 25 – Custo do RCV na literatura .....	62
Tabela 26 – Traços unitários secos em massa .....	63
Tabela 27 – Consumo real dos materiais (kg/m <sup>3</sup> ) para os concretos produzidos .....	64
Tabela 28 – Resistência à compressão do CC .....	64
Tabela 29 – Resistência à compressão do CAA.....	65
Tabela 30 – Resistência à compressão do CAA-RCV .....	66
Tabela 31 – Equações de comportamento .....	71
Tabela 32 – Classificação dos concretos no estado fresco .....	73
Tabela 33 – Absorção de água por capilaridade dos concretos.....	75
Tabela 34 – Densidade média em função do tempo.....	77
Tabela 35 – Variação de massa em função do patamar de temperatura.....	78
Tabela 36 – Média das velocidades (m/s) para cada patamar de temperatura em função da família de concreto .....	80
Tabela 37 – Qualidade do concreto em função da VPU para cada patamar de temperatura....	80
Tabela 38 – Fator de redução da resistência à compressão em função da temperatura .....	82
Tabela 39 – Análise ANOVA para resistência à compressão em função da temperatura.....	85

Tabela 40 – Comparação múltipla de médias – resistência à compressão em função do tipo de concreto .....	85
Tabela 41 – Comparação múltipla de médias – resistência à compressão em função do patamar de temperatura .....	86
Tabela 42 – Módulo de elasticidade médio (GPa) .....	87
Tabela 43 – Módulo de elasticidade normalizados .....	88
Tabela 44 – Análise ANOVA para módulo de elasticidade em função da temperatura .....	91
Tabela 45 – Comparação múltipla de média – módulo elasticidade em função do patamar de temperatura .....	92
Tabela 46 – Comparação múltipla de média – módulo de elasticidade em função do tipo de concreto .....	93
Tabela 47 – Custo dos materiais utilizados para a produção dos concretos, em R\$/kg .....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- °C/min: graus Celsius por minuto
- \$a: custo unitário kg do agregado miúdo
- \$C: custo unitário do kg de cimento
- \$f: custo unitário do kg de *filler*
- \$p: custo unitário do kg do agregado graúdo
- \$SP: custo unitário do kg do aditivo superplastificante
- a: relação agregado miúdo seco/cimento
- AAA: argamassa autoadensável
- ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
- a/c: relação água/cimento
- AG: agregado graúdo
- AM: agregado miúdo
- ANOVA: Análise de variância
- BCR: agregado de bloco de concreto reciclado
- C: absorção por capilaridade
- Cc: consumo de cimento por metro cúbico, em kg/m<sup>3</sup>
- CC: concreto convencional
- CP: corpo de prova
- CAA: concreto autoadensável
- CAA-RCV: concreto autoadensável com *filler* de resíduo de cerâmica vermelha
- CPV – ARI: Cimento Portland de alta resistência inicial
- CR: agregado de concreto reciclado
- Ct: custo de concreto por metro cúbico
- EE: Escola de Engenharia
- f: relação *filler*/cimento
- Fc: resistência à compressão
- FIB: Fédération Internationale du Béton
- g/cm<sup>2</sup>: grama por centímetro quadrado
- g/cm<sup>3</sup>: grama por centímetro cúbico
- HC: hydrocarbon curve
- LEME: Laboratório de ensaios e modelos estruturais
- LVDT: Linear Variable Differential Transformer

$k_{c,\theta}$ : resistência média à compressão do concreto na temperatura  $\theta$ / resistência média à compressão do concreto à temperatura ambiente

m<sup>2</sup>/kg: metro quadrado por quilograma

mm: milímetro

MPa: mega Pascal

ms: massa seca

msat: massa saturada

NBR: Norma Brasileira Regulamentada

p: relação agregado graúdo/cimento

PPGCI: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura

RCD: resíduo de construção e demolição

RCV: Resíduo de cerâmica vermelha

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

s: segundo(s)

SP%: dosagem de aditivo por metro cúbico

TR: agregado de tijolo reciclado

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UR: Umidade relativa

VPU: Velocidade de pulso ultrassônico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	13
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.3	DELIMITAÇÕES .....	17
1.4	LIMITAÇÕES.....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	COMPORTAMENTO DO CAA EM ELEVADAS TEMPERATURAS..	19
2.2	COMPORTAMENTO DO RCV NA MATRIZ CIMENTÍCIA .....	27
2.3	PESQUISAS SOBRE CONCRETOS EXPOSTOS A ELEVADAS TEMPERATURAS DESENVOLVIDAS NO LEME.....	35
<b>3</b>	<b>MÉTODO DE PESQUISA</b> .....	<b>37</b>
3.1	PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	37
3.2	MATERIAIS .....	39
3.2.1	Água.....	39
3.2.2	Cimento .....	40
3.2.3	Agregado graúdo.....	41
3.2.4	Agregado miúdo .....	42
3.2.5	<i>Filler</i> não pozolânico .....	43
3.2.6	Resíduo de cerâmica vermelha (RCV) .....	45
3.2.6.1	Composição granulométrica .....	46
3.2.6.2	Caracterização física .....	49
3.2.6.1	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) .....	49
3.2.7	Aditivo superplastificante.....	51
3.3	PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	51
3.3.1	Definição dos traços .....	51
3.3.2	Dosagem .....	52
3.3.3	Teor de argamassa .....	52
3.3.4	Processo de mistura.....	53
3.3.5	Moldagem dos Corpos de Prova .....	54
3.3.6	Cura.....	54
3.3.7	Sazonamento.....	54

3.4	CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	54
3.4.1	<i>Slump-flow Test (Slump-Flow Spread)</i> .....	55
3.4.2	<i>Slump-flow T50cm Test</i> .....	55
3.5	CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO .....	55
3.5.1	Absorção de Água por Capilaridade.....	56
3.5.2	Variação de massa.....	56
3.5.3	Resistência à compressão ambiente e após aquecimento .....	57
3.5.4	Módulo de elasticidade ambiente e após aquecimento .....	57
3.5.5	Homogeneidade do concreto .....	57
3.5.6	Avaliação visual de fissuras e <i>spalling</i> .....	59
3.6	EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS .....	59
3.7	ANÁLISE DE CUSTO .....	61
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>63</b>
4.1	DOSAGEM.....	63
4.1.1	Resistência à compressão.....	64
4.1.2	Curva de dosagem .....	69
4.2	ESTADO FRESCO.....	72
4.3	ESTADO ENDURECIDO .....	74
4.3.1	Absorção por capilaridade .....	75
4.3.2	Variação de massa.....	76
4.3.3	Homogeneidade do concreto .....	79
4.3.4	Resistência à compressão ambiente e após aquecimento .....	81
4.3.5	Módulo de elasticidade ambiente e após aquecimento .....	87
4.3.6	Avaliação visual de fissuras e <i>spalling</i> .....	93
4.4	ANÁLISE DE CUSTO .....	98
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>101</b>
5.1	CONCLUSÕES.....	101
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	103
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de composição granulométrica para o RCV.....</b>	<b>120</b>
A1	RCV peneirado.....	121

A2	RCV moído por 1h.....	121
A3	RCV moído por 1h e peneirada.....	122
A4	RCV moído por 2h.....	122
A5	RCV moído por 2h e peneirada.....	123
<b>APÊNDICE B – Regressão das curvas de dosagem.....</b>		<b>124</b>
B1	Regressão para o CC .....	125
B2	Regressão para o CAA .....	127
B3	Regressão para o CAA-RCV .....	129
B4	Lei de Lyse para todas as famílias de concretos .....	131
B5	Lei de Molinari para os concretos convencionais.....	132
B6	Lei de Molinari para o CAA .....	133
B7	Lei de Molinari para o CAA-RCV.....	134
<b>APÊNDICE C – Massa dos corpos de prova no estado endurecido .....</b>		<b>135</b>
C1	Massa em quilogramas do CC .....	136
C2	Massa em quilogramas do CAA .....	137
C3	Massa em quilogramas do CAA-RCV.....	138
<b>APÊNDICE D – Dimensões dos corpos de prova .....</b>		<b>139</b>
<b>APÊNDICE E – Densidade dos corpos de prova no estado endurecido..</b>		<b>141</b>
E1	CC.....	142
E2	CAA .....	143
E3	CAA-RCV.....	144
<b>APÊNDICE F – Variação de massa antes e após aquecimento.....</b>		<b>145</b>
F1	CC.....	146
F2	CAA .....	147
F3	CAA-RCV.....	148
<b>APÊNDICE G – Velocidade de pulso ultrassônico antes e após aquecimento.....</b>		<b>149</b>
G1	CC.....	150
G2	CAA .....	151

G3	CAA-RCV.....	152
----	--------------	-----

**APÊNDICE H – Resistência à compressão dos corpos de prova expostos aos patamares de temperatura..... 153**

H1	CC.....	154
----	---------	-----

H2	CAA .....	155
----	-----------	-----

H3	CAA-RCV.....	156
----	--------------	-----

**APÊNDICE I – Módulo de elasticidade dos corpos de prova expostos aos patamares de temperatura ..... 157**

I1	CC.....	158
----	---------	-----

I2	CAA .....	159
----	-----------	-----

I3	CAA-RCV.....	160
----	--------------	-----

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais em relação ao tema da pesquisa e a justificativa da importância do tema no desenvolvimento da tecnologia de concretos autoadensáveis e no âmbito do desempenho em elevadas temperaturas. Por fim, são apresentados os objetivos e limitações estabelecidos para a pesquisa.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Devido ao elevado consumo de recursos naturais, a indústria da construção civil é considerada uma das atividades menos sustentáveis do planeta (Edwards, 2009). Ademais, nas últimas décadas, a produção de resíduos de tijolos tem aumentado substancialmente, tanto a partir das fábricas como de atividades de demolição (Al-kroom *et al.*, 2022; Debieb; Kenai, 2008), resultando em grandes quantidades de pó de resíduos de tijolos sem tratamento adequado (Burgeois; Walsh; Gagnon, 2004). De acordo com Sun *et al.* (2020), a reciclagem de resíduos é a solução mais promissora para reduzir os impactos ambientais adversos em aterros causados pela indústria da construção e, cada vez mais pesquisas que relacionam o uso de resíduos como material para compor a matriz cimentícia vêm sendo desenvolvidas. No entanto, a incorporação de *filler* de resíduos não é recomendada em concretos convencionais, pois influenciam diretamente em diversas de suas propriedades, tais como: no estado fresco, trabalhabilidade, coesão e resistência à segregação e no estado endurecido, resistência à compressão e módulo de elasticidade (Silva; Brito; Dhir, 2014). Por outro lado, os concretos especiais, como os concretos autoadensáveis (CAA), que necessitam de grandes volumes de *filler* em sua composição, devido à necessidade de atender certas especificações quanto às propriedades no estado fresco (coesão, baixa segregação e exsudação), podem ser um excelente composto para utilizar em sua matriz essa parcela de resíduos finos, atendendo às suas exigências específicas. Segundo Bosiljkov (2003), a adição *filler* no CAA melhora diversas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido.

O CAA foi desenvolvido no Japão, no final da década de 80 pelo professor Ozawa e, trata-se de um concreto de alto desempenho, com excelente deformabilidade no estado fresco e alta resistência à segregação, dispensando a necessidade de qualquer vibração ou compactação e,

ao mesmo tempo, permitindo o preenchimento completo das seções das fôrmas. Recentemente, este concreto ganhou amplo uso na indústria da construção civil e diferentes tipos de materiais vêm sendo estudados como adição de *filler*, como por exemplo, cinzas volantes, escória de alto-forno, sílica ativa entre outros materiais pozolânicos e não pozolânicos.

Caracterizado por um alto volume de argamassa, teor de aditivos e proporção de agregados graúdos e miúdos próximo de 1 (Fares; Noumowe; Remond, 2009), as vantagens na utilização do CAA são inúmeras. Em contrapartida, a composição do CAA faz com que esse responda com maior deterioração das propriedades mecânicas residuais após exposição a temperaturas elevadas em comparação ao CC (Abed; Nemes; Lubl6y, 2020). Segundo Kirchhof (2010), os concretos de alta compacidade possuem reduzida porosidade e baixa permeabilidade, que por sua vez favorecem o aprisionamento do vapor de 6gua nos poros, acarretando um acréscimo da pressão interna e, conseqüentemente, em tens6es que podem superar a resist6encia 6 traç6o do concreto, gerando o fen6meno “*spalling*” ou lascamento explosivo. Lima *et al.* (2003) constatou que, 6 medida que a compacidade do material aumenta, a vulnerabilidade ao aquecimento cresce proporcionalmente. Dessa forma, a verificaç6o do comportamento ap6s exposiç6o a elevadas temperaturas se torna crucial.

Assim, faz-se necess6rio o desenvolvimento de pesquisas que abordem o comportamento do CAA quando submetida a elevadas temperaturas, principalmente, tendo-se em vista que os poucos estudos feitos at6 o momento t6m apresentado um grande risco de *spalling* quando exposto a temperaturas elevadas (Pathak; Siddique, 2012; Franchetto, 2022), especialmente para temperaturas acima de 300°C (Fares *et al.*, 2010; Persson, 2004; Pineaud *et al.*, 2016) e teores de umidade superiores a 75% para os concretos de alta resist6encia e compacidade (Kirchhof, 2010).

A resist6encia 6 compress6o do concreto tem seu valor reduzido em funç6o do aumento da temperatura. O calor transmitido 6 estrutura em um determinado per6odo gera em cada elemento estrutural certa distribuiç6o de temperatura, e esta pode variar em funç6o da forma do elemento, exposiç6o ao fogo, temperatura m6xima atingida e da qualidade dos materiais utilizados. Esse processo afeta as propriedades dos materiais e pode provocar alongamentos axiais restringidos ou de gradientes t6rmicos. Quando submetido 6 exposiç6o de elevadas temperaturas, o concreto pode manifestar o *spalling*. A perda de resist6encia e o *spalling* s6o as principais raz6es para a falha de um elemento de concreto em elevadas temperaturas. Segundo Khoury e Anderberg

(2000), o *spalling*, em sua forma mais geral, pode ser definido como o rompimento violento ou não violento de camadas ou pedaços de concreto da superfície de um elemento, quando este é exposto a temperaturas elevadas ou a rápidas taxas de aquecimento, tal como as situações experimentadas em incêndios. De acordo com a FIB (2007), existem seis tipos de *spalling*: de agregado, explosivo, escamação superficial, delaminação, de quebra de canto e pós-resfriamento. Dentre todas as categorias, a mais perigosa é o *spalling* explosivo, que ocorre de forma violenta e resulta em sérios danos ao material. Há então a necessidade de analisar o comportamento do concreto frente a situações de incêndio, de forma que seja possível mensurar as propriedades residuais. A relevância destes efeitos, sob o ponto de vista do comprometimento do desempenho e durabilidade dos elementos construtivos, justifica a motivação desta pesquisa.

Paralelo a isso, pesquisas relacionadas ao uso de materiais provenientes do aproveitamento de resíduos de construção vêm sendo cada vez mais encontradas na comunidade científica. Suas propriedades mecânicas à temperatura ambiente foram investigadas abundantemente. Entretanto, apesar do acervo encontrado na literatura relacionado ao tema, poucos estudos levaram em consideração as propriedades residuais após exposição a elevadas temperaturas, principalmente quando aplicado em CAA. Segundo Gomes *et al.* (2003), o desenvolvimento de um CAA utilizando alta dosagem de resíduos sólidos industriais, na forma de *filler*, é uma contribuição positiva para o desenvolvimento sustentável do concreto. O ganho ecológico que pode ser obtido a partir do reaproveitamento de resíduos sólidos como material fino é bastante considerável.

Diversos materiais provenientes de resíduos da construção, com ou sem propriedades pozolânicas, vêm sendo desenvolvidos, na tentativa de oferecer ao mercado novos materiais com boas propriedades de desempenho, como durabilidade e resistência ao fogo e, ao mesmo tempo, com um baixo custo. Como exemplo, a incorporação de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) à matriz de concretos tem sido largamente estudada (Achak; Sohrabi; Hoseini, 2023; Aksoylu *et al.*, 2023; Nepomuceno; Isidoro; Catarino, 2018; Ray *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2018).

Os resíduos da indústria de cerâmica vermelha, devido às variações no processo de queima e na composição da matéria-prima, podem apresentar diferentes índices de pozolanicidade. Entretanto, estudos feitos com esse resíduo têm mostrado unanimidade nos resultados quando analisada a capacidade de absorção de água. Tal característica está relacionada à porosidade

inerente à estrutura da cerâmica. Essa porosidade do material pode ser capaz de contribuir na diminuição do efeito *spalling*, visto que a ocorrência deste fenômeno, induzido pelo calor, está relacionada a fatores termohidromecânicos expressa pela dilatação térmica e gradientes de pressão de poros (Kalifa; Menneteau; Quenard, 2000).

O CAA é um concreto produzido com maiores quantidades de materiais finos e menores relações água/aglomerante, portanto, ele pode ser caracterizado por uma baixa porosidade, principalmente quando comparado aos concretos convencionais. Paralelamente, diversos autores concluíram que o uso de resíduos afeta as propriedades do concreto em temperaturas elevadas, aumentando as propriedades mecânicas residuais e diminuindo a possibilidade de fragmentação explosiva (Cree; Green; Noumowé, 2013; Laneyrie *et al.*, 2016; Sarhat; Sherwood, 2013; Vieira; Correia; Brito, 2011). Da mesma forma, Garcia-Troncoso *et al.* (2021) concluíram que, devido às propriedades inerentes de resistência ao fogo do tijolo de cerâmica vermelha, o seu uso pode contribuir a um aumento na resistência a temperaturas de até 400°C. Ainda, devido à estrutura porosa do RCV, capaz de auxiliar na redução da pressão interna dos poros, o risco de *spalling* no CAA pode diminuir. Rohden *et al.* (2020) elucidam que o fenômeno de fragmentação do concreto induzido pelo calor é altamente influenciado pelo teor de umidade, compacidade e porosidade da matriz de concreto.

Sendo assim, acredita-se que há a necessidade de se desenvolver e estudar novos materiais que atendam ao desempenho e à segurança esperados para uma edificação, com um impacto menor ao meio ambiente. A partir desta premissa, optou-se por analisar a influência da utilização de *filler* de RCV no comportamento do CAA quando submetido a elevadas temperaturas. Dessa forma, essa pesquisa visa contribuir não apenas para a inserção dos materiais reciclados ao ciclo de vida de elementos construtivos, como também contribuir para um melhor desempenho de edificações em situações de incêndio. Portanto, decidiu-se voltar o foco deste trabalho para utilização do concreto autoadensável com resíduo de cerâmica vermelha (CAA-RCV) com a finalidade de melhorar o comportamento mecânico do material quando submetido a elevadas temperaturas.

## 1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo estabelecido para a presente pesquisa consiste em:

Investigar experimentalmente a trabalhabilidade, o comportamento residual mecânico e a durabilidade do CAA produzido com *filler* de RCV sob a ação de elevadas temperaturas.

Como objetivos secundários, apresentam-se:

- Avaliar a influência da incorporação de *filler* de RCV no CAA quanto às propriedades do concreto no estado fresco (espalhamento e tempo de escoamento);
- Avaliar a influência da incorporação de *filler* de RCV no CAA quanto às propriedades do concreto no estado endurecido (absorção por capilaridade e resistência à compressão);
- Avaliar a degradação das propriedades mecânicas por meio da variação de massa e do ensaio de Velocidade de Pulso Ultrassônico;
- Avaliar o impacto da utilização de *filler* de RCV no CAA pelo aspecto econômico, verificando o custo de sua incorporação no concreto;
- Avaliar a influência da utilização do RCV no CAA submetido a elevadas temperaturas com relação à ocorrência de *spalling* explosivo.

## 1.3 DELIMITAÇÕES

Algumas delimitações para esta pesquisa foram definidas:

O trabalho delimita-se a avaliar as propriedades mecânicas residuais e a ocorrência de *spalling* do CAA produzido com finos não pozolânicos e finos de RCV.

RCV estudado foi delimitado a apenas uma origem de um mesmo lote. Ademais, o resíduo passou pelo processo de moagem e peneiramento.

Todas as famílias foram produzidas com um único tipo de cimento (CP V-ARI) e um tipo de superplastificante (ADVA® 458).

## 1.4 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) O resfriamento não foi controlado devido à falta de equipamentos que possibilitassem esse controle. Todos os corpos de prova foram resfriados a temperatura ambiente;
- b) Devido às limitações de configuração do forno, tempo e quantidade de corpos de prova, foram utilizados cinco patamares de temperatura, incluindo a temperatura ambiente e outros quatro patamares de temperatura (200, 400, 600 e 800 °C), com o objetivo de obter uma curva do fator de redução de resistência em função do aquecimento semelhante à da apresentada na NBR 15200 (ABNT, 2012b);
- c) Após realizado o estudo de dosagem, foi escolhido apenas um traço (intermediário) para a realização do programa experimental.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda, primeiramente, o comportamento do CAA submetido a elevadas temperaturas. Em seguida, são apresentados estudos relacionados ao concreto com RCV e sua respectiva influência no comportamento da matriz cimentícia.

### 2.1 COMPORTAMENTO DO CAA EM ELEVADAS TEMPERATURAS

A quantidade de estudos sobre o comportamento do CAA exposto a elevadas temperaturas vem crescendo nos últimos anos, entretanto ainda há uma carência de pesquisas sobre o tema. Dentre os trabalhos levantados para a presente pesquisa, há estudos que buscam identificar a influência de diferentes adições, como por exemplo, a sílica ativa, a cinza volante e o calcário; estudos que avaliaram a influência das dimensões dos corpos de prova, cúbicos ou cilíndricos; a influência do tipo de resfriamento, com água ou ar; a influência das classes de resistência. Na Tabela 1, são apresentados alguns estudos relacionados ao comportamento de CAA quando expostos a elevadas temperaturas, priorizando os que realizam a verificação da influência da resistência e das adições de *fillers*. Ademais, são especificados o tipo de *filler* utilizado, a curva de aquecimento, o patamar de temperatura máximo e se foi manifestada ou não a ocorrência de *spalling* em cada estudo apresentado.

O comportamento do CAA frente às transformações químicas, físicas e mineralógicas, quando submetido a temperaturas elevadas, pode ser complexo. Apesar disso, alguns estudos mostraram diminuição da resistência e aumento do risco de *spalling* ou comportamento semelhante ao do concreto vibrado (Pathak; Siddique, 2012). Garcia-Troncoso *et al.* (2021) estudaram a influência dos diferentes tipos de agregado graúdo reciclado no desempenho do CAA com *filler* de sílica ativa submetido a elevadas temperaturas. Dentre os agregados estudados, encontram-se o agregado de concreto reciclado (CR), o agregado de resíduo de cerâmica vermelha (RCV) e o agregado de bloco de concreto reciclado (BCR). Os autores concluíram que os concretos com RCV e BCR obtiveram uma resistência maior que o concreto com agregado natural quando submetido a temperaturas entre 400 e 600°C. Dentre os agregados estudados, o TR possuiu uma porosidade e retração por secagem maior.

Tabela 1 – Estudos sobre CAA em elevadas temperaturas

(continua)

<b>Autor</b>	<b>Taxa de Aquecimento (°C/min)</b>	<b>T<sub>máx</sub> (°C)</b>	<b>Filler</b>	<b>Spalling</b>
Jain <i>et al.</i> (2023)	10	800	CV	NC
Kanagaraj <i>et al.</i> (2023)	NC	1000	CV/ SA/ MK	NC
Franchetto (2022)	1	1000	Areia	Sim
Nuruzzaman <i>et al.</i> (2023)	5	600	EF	Não
Solomon <i>et al.</i> (2022)	CP	900	CV	NC
Alobaidi, Hilal e Faraj (2021)	AL	700	CV	Sim
Garcia-Troncoso <i>et al.</i> (2021)	10	800	SA	NC
Mathews <i>et al.</i> (2021)	ISO 834	1029	CV e EAF	NC
Mohammadyan-Yasouj, Heidari e Shokravi (2021)	1	600	RAP	NC
Mujedu <i>et al.</i> (2021)	2,7	1000	COP	NC
Abed e Brito (2020)	ISO 834	800	CV/ PP/ RCC	Não
Abed, Nemes e Lublóy (2020)	ISO 834	800	CV/ PP	Não
AzariJafari <i>et al.</i> (2019)	1	700	CV/ SA/ MK	Não
Mahapatra e Barai (2019)	2,5	600	CV/ NSC	Não
Aslani e Ma (2018)	5	900	CV/ SA/ EAF	Sim (300°C)
Mansoor <i>et al.</i> (2018)	NC	500	SA/ EAF/ RMP	Sim (500°C)
Alsubari <i>et al.</i> (2018)	NC	600	COP	Sim
Reddy e Ramaswamy (2017)	12	800	CV/ SA	Sim (398°C)
Anand, Godwin e Arulraj (2016)	CP	900	CV/ SA/ MK	Sim
Godwin <i>et al.</i> (2016)	NC	900	CV/ SA/ MK	Sim
Pineaud <i>et al.</i> (2016)	1	600	CL/ CL e SA	NC
Al-Kadi, Alhasana e Al Qadi (2016)	AL	600	CV	Sim (600°C)
Fares <i>et al.</i> (2015)	1	400	CV	Não
	ISO 834	600		Sim (425°C)
Nuruiddin, Azmee e Yung (2014)	AL	1200	CCA e CV	Sim (400°C)
Anand e Arulraj (2014)	CP	900	CV	NC
Jansson e Boström (2013)	ISO 834 e CH	NC	CL	Sim
Seshu e Pratusha (2013)	NC	800	CV	Sim
Tao <i>et al.</i> (2013)	5, 10 e 15	700	CL	NC
Tao, Yuan e Taerwe (2013)	5	800	CL	NC

(conclusão)

Autor	Taxa de Aquecimento (°C/min)	T <sub>máx</sub> (°C)	Filler	Spalling
Annerel e Taerwe (2013)	5	400	CL	Não
Bamonte e Gambarova (2012)	1 a 2	600	CL	NC
Pathak e Siddique (2012)	1	300	CV	NC
Uysal (2012)	1	800	RMP/ CL/ BP	Sim (600°C)
Bakhtiyari <i>et al.</i> (2011)	10	1000	QZ/ CL	Sim (500°C)
Tao, Yuan e Taerwe (2010)	5	800	CL	Sim (350°C)
Annerel e Taerwe (2011)	5	500	CL	Não
Fares <i>et al.</i> (2010)	1	600	CL	Sim (300°C)
Fares, Noumowe e Remond (2009)	1	600	CL	Sim (315°C)
Anagnostopoulos, Sideris e Georgiadis (2009)	10	600	CL/ EAF/ VD	Sim (600°C)
Sideris (2007)	5	700	CV	Sim (380°C)
AL – Aquecimento lento	CV – Cinza volante		RCC – Resíduo de concreto celular	
BP – Basalto em pó	EAF – Escória de alto forno		RAP – Resíduo de alumina em pó	
CCA – Cinza de casca de arroz	EF – Escória de ferroníquel		RMP – Resíduo de mármore em pó	
CL – Calcário	MK – Metacaulim		SA – Sílica ativa	
CH – Curva de incêndio de hidrocarbonetos	NC – Não comenta		VD – Vidro em pó	
COP – Cinza de óleo de palma	NSC- Nano sílica coloidal			
CP – Curva própria	PP – Perlita em pó			
	QZ – Quartzo em pó			

Fonte: elaborado pelo autor.

Em relação à avaliação de *fillers* e seu efeito sobre o comportamento do CAA, Abed, Nemes e Lublój (2020) estudaram a influência dos *fillers* de resíduos de cinza volantes e de resíduos de perlita em pó, constatando que a resistência para temperaturas de até 800°C do CAA foi aprimorada com a substituição do cimento em até 15% do resíduo de perlita em pó, enquanto o resíduo de cinza volantes não afetou significativamente as resistências à compressão residual e à flexão em temperaturas elevadas. Os autores não constataram presença de *spalling*. Da mesma forma, Abed e Brito (2020) não encontraram presença de *spalling* e, ao comparar os *fillers* de cinzas volantes, perlita em pó e concreto celular, concluíram que o resíduo de perlita em pó e de concreto celular melhoram a estrutura dos poros e atuam muito bem como *filler*. Já o *filler* de resíduo de cinza volante ocasionou a presença de mais poros na matriz cimentícia. Alsubari *et al.* (2018) analisaram o efeito do uso de cinza combustível de óleo de palma e constatou a presença de microfissuras nas superfícies das amostras aquecidas até 400°C e, com o aumento da temperatura para 600°C, fissuras passaram a ser observadas. Kanagaraj *et al.* (2023) comparou três diferentes de adições, cinza volante, sílica ativa e metacaulim ao CAA. Para as

amostras expostas a 1000°C, a mistura com metacaulim produziu a menor resistência residual em comparação as outras misturas.

A influência do *filler* calcário no CAA foi estudada por diversos autores (Annerel; Taerwe, 2011; Bakhtiyari *et al.*, 2011; Jansson; Boström, 2013; Uysal, 2012; Tao; Yuan; Taerwe, 2010). Dentre os autores que observaram a presença de *spalling*, Jansson e Boström (2013) constataram que, ao submeter as amostras a um aquecimento de curva ISO 834 (1999), o concreto com 140 kg/m<sup>3</sup> de *filler* calcário sofreu substancialmente mais *spalling* do que um concreto sem *filler* com mesma relação água/cimento e resistência aos 28 dias. Uysal (2012) e Tao, Yuan e Taerwe (2010) utilizaram reduzidas taxas de aquecimento de 1 e 5 °C, respectivamente, e observaram a ocorrência de *spalling* ao utilizar o calcário como *filler* no CAA. Uysal (2012) observou o fenômeno a partir da temperatura de 600 °C, utilizando teores de *filler* de 55, 110 e 165 kg/m<sup>3</sup>. Já Tao, Yuan e Taerwe (2010), observaram a ocorrência de *spalling* explosivo para temperaturas superiores a 350 °C, para as amostras com teor de 200 kg/m<sup>3</sup> de *filler* calcário. Por outro lado, Annerel e Taerwe (2011), submeteram seus corpos de prova a um aquecimento de 105 °C até atingirem a constância de massa e, ao utilizarem a taxa de 5 °C/min de aquecimento e um teor de *filler* calcário de 300 kg/m<sup>3</sup>, não identificaram a presença de *spalling* no CAA.

Diversos autores estudaram a utilização da cinza volante como *filler* em CAA submetido a elevadas taxas de temperatura (Al-Kadi; Alhasana; Al Qadi, 2016; Alobaidi; Hilal; Faraj, 2021; Anand; Arulraj, 2014; Jain *et al.*, 2023; Pathak; Siddique, 2012; Sideris, 2007; Seshu; Pratusha, 2013; Solomon *et al.*, 2022). Sideris (2007) identificou a presença de *spalling* explosivo nas amostras com teor de 20 kg/m<sup>3</sup> de cinza volante, submetidas a temperaturas superiores a 380 °C, para uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. Seshu e Pratusha (2013) e Alobaidi, Hilal e Faraj (2021) constataram a presença de *spalling* e Al-Kadi, Alhasana e Al Qadi (2016) constataram o fenômeno para temperaturas superiores a 600 °C. Jain *et al.* (2023) estudaram a utilização do *filler* de cinza volante misturada com resíduo de granito em pó como substituição do agregado fino natural submetido a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e temperaturas de até 800 °C. Os resultados dos testes revelaram que o CAA misturado com cinza volante contendo resíduo de granito em pó (até 60%) apresentou melhores propriedades pós-incêndio, com propriedades mecânicas e de durabilidade ideais em 30%. Ainda, Fares *et al.* (2015) estudaram dois tipos de curva de aquecimento para o mesmo tipo de CAA com adição de cinzas volantes. Os corpos de prova submetidos à curva de aquecimento de 1 °C/min não apresentaram

ocorrência de *spalling*, entretanto, os corpos de prova submetidos ao aquecimento da curva ISO 834 (1999) sofreram *spalling* a partir dos 425°C, exemplificando que a taxa de aquecimento pode influenciar também na ocorrência de *spalling*.

Alguns autores analisaram o uso de diferentes tipos de *fillers* no CAA. Nuruddin, Azmee e Yung (2014) observaram o uso de cinza de casca de arroz e cinza volante, para um aquecimento lento e observaram a ocorrência de *spalling* superficial a partir de 400 °C, entretanto a utilização desses *fillers* levaram a um melhor desempenho a elevadas temperaturas em comparação à amostra de controle. Anand, Godwin e Arulraj (2016) e Godwin *et al* (2016) avaliaram o uso de cinza volante, sílica ativa e metacaulim como *fillers* no CAA e em ambas as pesquisas foi observada a ocorrência de *spalling*. Todavia, nenhum dos autores especifica a taxa de aquecimento utilizada. Reddy e Ramaswamy (2017) observaram a ocorrência de *spalling* ao incorporar no CAA a cinza volante e a sílica ativa como *filler*, para uma taxa de aquecimento de 12 °C/min, entre 398 e 410 °C. Aslani e Ma (2018) analisaram o uso dos *fillers* cinza volante, sílica ativa e escória de alto forno e observaram a presença de *spalling* explosivo aos 300 °C nas amostras de CAA com escória de alto forno, para uma taxa de aquecimento de 5 °C/min. De igual forma, Anagnostopoulos, Sideris e Georgiadis (2009) utilizaram os *fillers* calcário, escória de alto forno e vidro no CAA a temperaturas elevadas com taxa de aquecimento de 10 °C/min e identificaram a presença de *spalling* explosivo em todas as amostras submetidas a temperaturas superiores a 600°C.

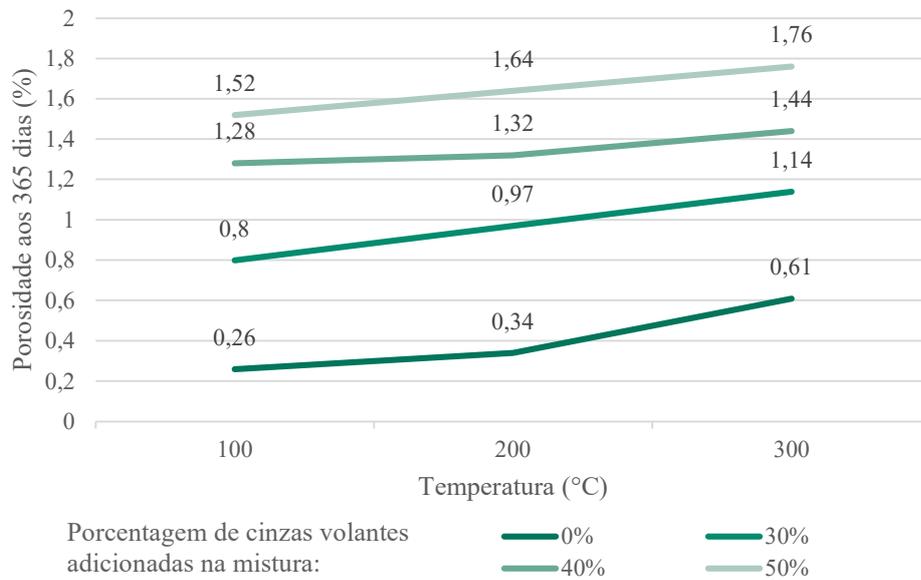
Mansoor *et al.* (2018) compararam os concretos autoadensáveis com *filler* de sílica ativa, resíduo de mármore em pó e escória de alto forno, submetidos à temperatura máxima de 500 °C. A comparação dos concretos mostrou que a sílica ativa e o resíduo de mármore em pó são viáveis para propriedades de compressão e flexão, mas, no caso de tração, a escória de alto forno apresentou melhores resultados. Nuruzzaman *et al.* (2023) estudaram a resistência residual e o comportamento de deterioração após exposição a elevadas temperaturas do CAA produzido com escória de ferroníquel. Foram estudadas quatro misturas de CAA usando até 50% de escória de ferroníquel moída como substituto do cimento e 40% de ferroníquel bruto como substituto da areia, e nenhuma amostra apresentou *spalling* explosivo ou rachaduras. As amostras foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 5 °C/min e uma temperatura máxima de 600 °C.

Fares *et al.* (2010) observaram, por meio de imagens de MEV, que as fissurações começaram a aparecer nas amostras a partir dos 300°C, principalmente na zona de transição interfacial dos agregados e pasta. Os autores concluíram que essas ocorrências se devem à presença de quartzo nos agregados. Entretanto, as mesmas observações foram constatadas para ambos os tipos de concreto, autoadensável e convencional. Ainda, os autores observaram, em todas as amostras, um aumento gradual e uniforme da porosidade com o aumento da temperatura. E isso pode ser justificado pela presença de deterioração da pasta de cimento com a saída da água existente na matriz. Fares, Noumowe e Remond (2009) analisaram o comportamento do CAA para cada faixa de temperatura, concluindo que, para as temperaturas entre 20°C e 150°C, a evaporação da água livre levou ao aumento da porosidade e permeabilidade dentro do CAA. Entre 150°C e 300°C, a expulsão da água ligada resultou em perda de massa e modificou as propriedades de ligação dos produtos de hidratação da pasta de cimento. No entanto, foi observado também para esta mesma faixa de temperatura um aumento da resistência à compressão, podendo ser atribuído à reidratação da pasta devido à migração de água nos poros. De 300°C a 600°C as propriedades físicas e mecânicas diminuíram com o aparecimento de microfissuras que levaram à ruptura do concreto. Ainda, a partir de 315°C, foi observado *spalling* nas amostras de CAA, enquanto nenhuma amostra de concreto vibrado apresentou algum tipo de fragmentação.

Adicionalmente, a estrutura dos poros na matriz cimentícia, bem como a porosidade inerente aos materiais utilizados podem estar relacionadas ao comportamento residual mecânico do concreto a elevadas temperaturas. Pathak e Siddique (2012), ao relacionarem a resistência à compressão residual ao fator de porosidade das amostras com idade de 365 dias, os autores identificaram um aumento na resistência para as temperaturas entre 200°C e 300°C. Ainda, a porosidade do material também aumentou conforme o aumento de temperatura. A Figura 1 ilustra a porosidade dos corpos de prova aos 365 dias, conforme a porcentagem de cinza volante existente na mistura, medida por meio da técnica de saturação a vácuo ASTM (ASTM, 2002).

Analogamente, Fares *et al.* (2010) e Fares, Noumowe e Remond (2009) identificaram um aumento da porosidade conforme o aumento da temperatura. Fares *et al.* (2010) ao observar que houve tanto um aumento da resistência ( $\approx 30\%$ ) quanto um aumento da porosidade ( $\approx 10\%$ ) entre 150°C e 300°C, concluíram que o aumento da resistência não pode ser atribuído a uma diminuição da porosidade, mas sim a uma modificação das propriedades de ligação dos hidratos da pasta de cimento.

Figura 1 – Porosidade dos corpos de prova conforme porcentagem de cinzas volantes adicionadas na mistura



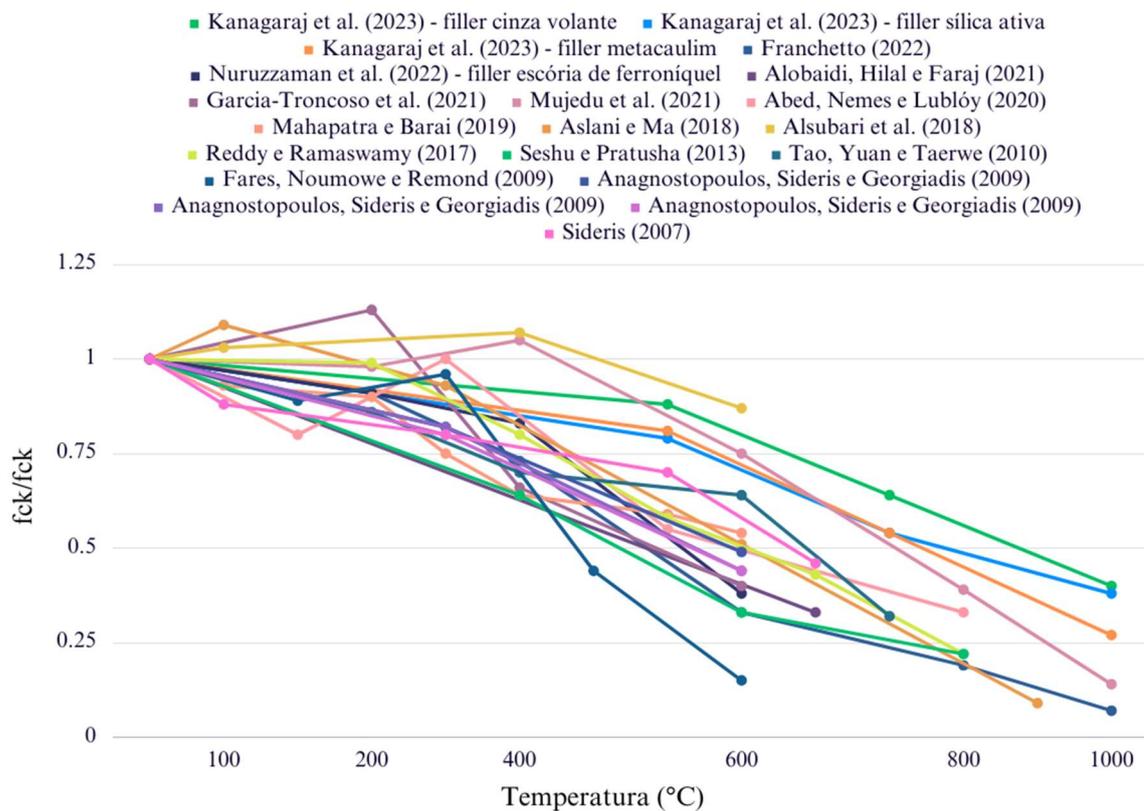
Fonte: adaptado de Pathak e Siddique (2012).

Contudo, o comportamento do concreto sob temperaturas elevadas não está relacionado somente à composição do concreto. Conforme BS8110-2 (1985), o *spalling* pode estar relacionado a rápidas taxas de aquecimento, a grandes tensões de compressão ou a altos teores de umidade. Fatores como estes podem variar conforme o procedimento e condições de ensaio escolhidas. A Figura 2 indica as resistências à compressão residual observada em diferentes pesquisas, para os diferentes patamares de temperatura, tipos de *filler* e curvas de aquecimento. Entretanto, a partir da figura abaixo, é possível observar que, independentemente do *filler* utilizado e do método de aquecimento escolhido, todos os concretos perderam mais de 50% da resistência à compressão na temperatura ambiente após serem submetidos ao patamar de 1000°C.

Abed e Brito (2020) e Abed, Nemes e Lublóy (2020) seguiram os procedimentos da RILEM TC 200-HTC (2007) para moldagem, cura e sazamento dos corpos de prova. Para a curva de aquecimento, os autores utilizaram a ISO 834 (1999). Ambos não identificaram a ocorrência de *spalling*. Igualmente, Aslani e Ma (2018) utilizaram a ISO 834 (1999) para a determinação da curva de aquecimento e, realizaram o procedimento de armazenagem à temperatura ambiente até que fosse atingido um peso seco constante, identificando a ocorrência de *spalling*. Bakhtiyari et al. (2011) seguiram, de igual forma, o procedimento da ISO 834 (1999) para a determinação da curva de aquecimento e, para o processo de cura, os autores mantiveram os corpos de prova úmidos por cerca de 24 h. Após a desmoldagem, foram mantidos sob água a

23°C por 7 dias. Em seguida, conservados sob condições laboratoriais controladas ( $25\pm 5$  °C e  $42\pm 3\%$  de umidade) até a realização dos ensaios. O regime de cura realizado pelos autores é semelhante às condições reais de moldagem do concreto no Irã, local onde foi realizada a pesquisa. Foi identificada pelos autores a ocorrência de *spalling* para as amostras com *filler* de quartzo e para as amostras com *filler* de calcário a temperaturas superiores a 500°C e 700°C, respectivamente.

Figura 2 – Compressão residual do CAA em função da temperatura



Fares *et al.* (2010), Fares, Noumowe e Remond (2009) e Pathak e Siddique (2012) seguiram os procedimentos de cura, armazenagem e aquecimento conforme recomendações da RILEM TC 129-MHT (2004). Uysal (2012) utilizou um processo de aquecimento semelhante ao da RILEM TC 129-MHT (2004), a um processo de armazenagem no qual os corpos de prova foram mantidos a temperatura ambiente até o 56º dia em laboratório, com a umidade relativa e a temperatura de aproximadamente 60% e 20°C, respectivamente. Fares *et al.* (2010) e Fares, Noumowe e Remond (2009) identificaram a ocorrência de *spalling* para temperaturas superiores a 300°C e Uysal (2012) verificou a ocorrência para temperaturas superiores a 600°C.

Annerel e Taerwe (2011) armazenaram suas amostras a uma umidade relativa de 60%, a uma temperatura de  $20 \pm 1$  °C por cerca de 29 meses e não identificou a ocorrência de *spalling*. Por outro lado, Anagnostopoulos, Sideris e Georgiadis (2009) submeteu seus corpos de prova a uma cura úmida por 28 dias e depois os deixou em temperatura ambiente ( $20 \pm 2$  °C, umidade relativa de 65%), e os testou após a idade de 180 dias, constatando a presença de *spalling* para as temperaturas superiores a 400°C. Já os corpos de prova de Sideris (2007) foram inicialmente curados durante os primeiros 14 dias em água de cal saturada a  $20 \pm 2$ °C e nos 14 dias seguintes, foram curados sob estopa úmida na mesma temperatura. A partir dessa idade, eles foram colocados a temperatura ambiente do laboratório (umidade relativa de 50% a 60% e temperatura de  $20 \pm 2$ °C). Analogamente a Anagnostopoulos, Sideris e Georgiadis (2009) e Sideris (2007) constataram a ocorrência de *spalling* para temperaturas superiores a 400°C. Para Tao, Yuan e Taerwe (2010) a ocorrência de *spalling* foi identificada a partir dos 350°C. Todos os corpos de prova dos autores foram mantidos a temperatura de  $20 \pm 3$ °C e umidade relativa de 90% em sala de cura por 28 dias. Em seguida, os corpos de prova foram movidos para a temperatura ambiente por 90 dias.

Jansson e Boström (2013) seguiram os procedimentos da DIN EN 1363-1 (1999) e identificaram a ocorrência de *spalling*. Anand, Godwin e Arulraj (2016) e Alsubari *et al.* (2018) não especificaram os procedimentos utilizados para a cura, sazonalidade e curva de aquecimento, entretanto, detectaram, também, a ocorrência de *spalling*.

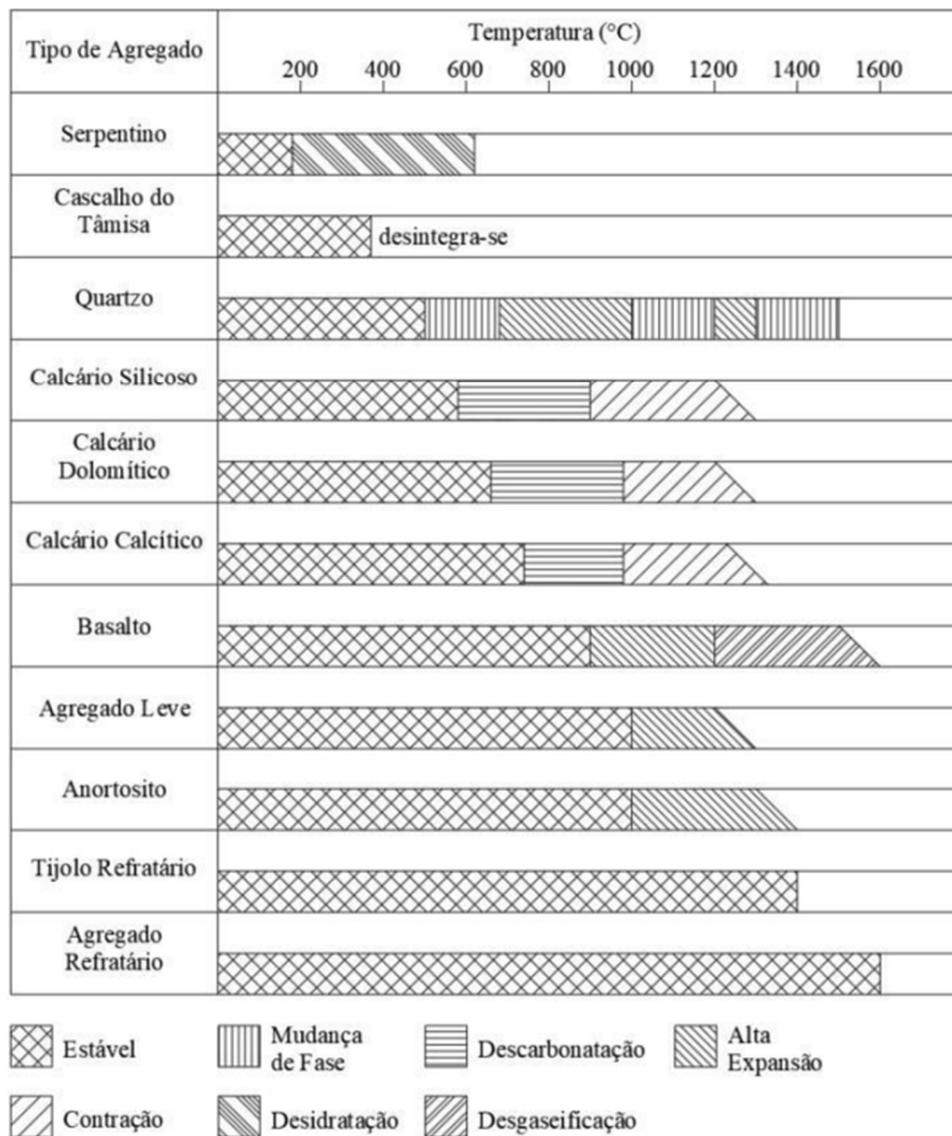
## 2.2 COMPORTAMENTO DO RCV NA MATRIZ CIMENTÍCIA

A incorporação de RCV em frações muito finas afeta diversas propriedades do concreto, tais como a trabalhabilidade, a coesão e a segregação no estado fresco, e a durabilidade e a resistência mecânica no estado endurecido (Silva; Brito; Dhir, 2014). Em contrapartida, o *filler* de RCV pode ter grande potencial de aplicação no CAA, devido à necessidade de uma maior proporção de *filler* nesse tipo de concreto, a fim de atender aos requisitos de coesão e fluidez estabelecidos pelas normas.

Paralelamente, a umidade e vapor de água presentes no CAA, sob influência das elevadas temperaturas, dificilmente podem ser removidos, devido à redução da porosidade e às ligações dos poros capilares do CAA. Esse processo resulta em um aumento significativo da poropressão, resultando em tensões capazes de causar desprendimento explosivo no concreto. Em contrapartida, uma das abordagens inovadoras na produção de concretos resistentes a

elevadas temperaturas é a utilização de resíduos cerâmicos (Ogrodnik; Zegardło; Halicka, 2012), uma vez que todos os produtos confeccionados com argilas cozidas apresentam a vantagem de resistir a elevadas temperaturas (Zegardło, Szelag e Ogrodnik, 2018). Tendo isso em vista, esta revisão bibliográfica tem como objetivo, também, analisar o comportamento do RCV na matriz do concreto. Na Figura 3 é apresentada a estabilidade mineralógica da cerâmica, que permanece estável até a temperatura de 1400°C.

Figura 3 – Comportamento dos agregados durante aquecimento



Fonte: adaptado de Fares (2010).

Hussein *et al.* (2022), investigaram o desempenho do concreto leve estrutural contendo RCV. Seus resultados indicaram que o concreto leve pode ser produzido utilizando o RCV como

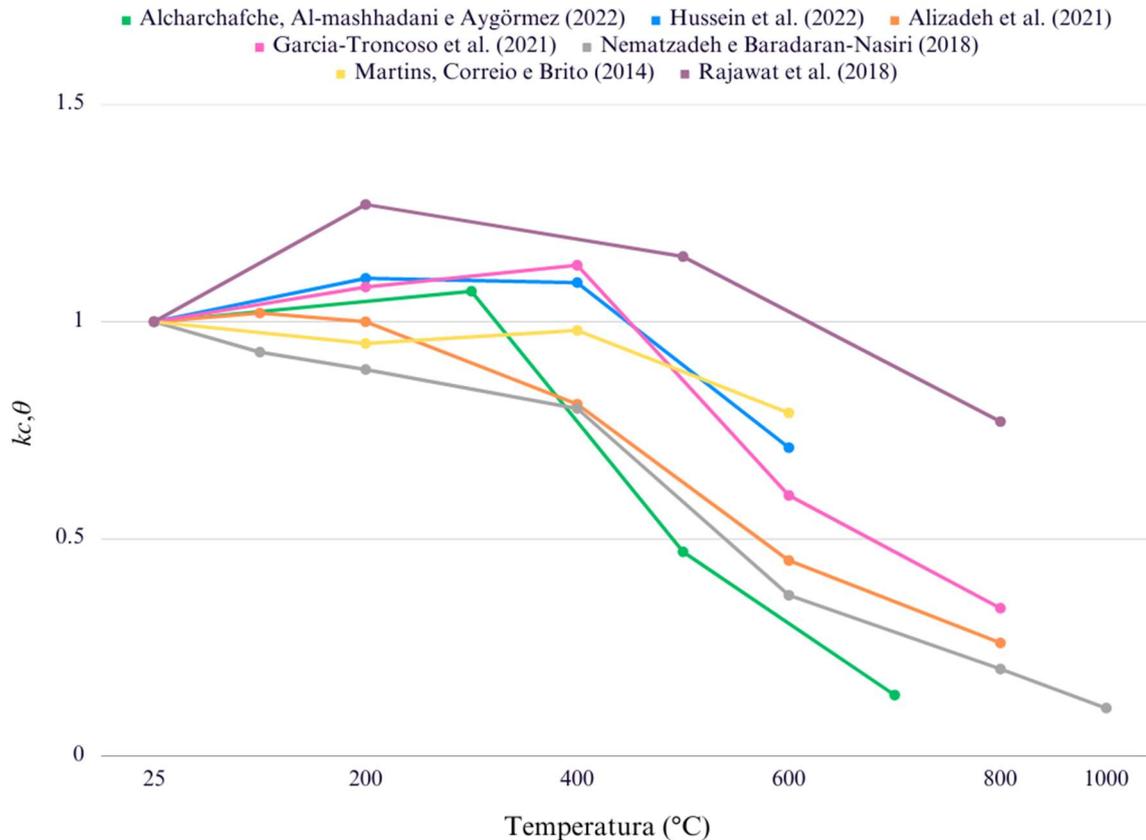
substituto de 100% do agregado, apresentando um aumento da resistência residual após exposição a temperatura de 200°C. Outro estudo, conduzido por Martins, Correia e Brito (2014), examinou a resistência residual de misturas de concreto contendo diferentes porcentagens de RCV (20, 50 e 100%) em elevadas temperaturas. Verificou-se que a resistência mecânica geralmente é melhorada pela adição de agregados de RCV, embora algumas amostras expostas a 600°C sofreram *spalling* explosivo.

Nematzadeh e Baradaran-Nasiri (2018) avaliaram as propriedades mecânicas residuais do CC contendo 0, 25, 50, 75 e 100% de agregado fino de RCV em temperaturas elevadas. Os autores constataram que maiores teores de agregado fino de RCV melhoram o comportamento à compressão do concreto em temperaturas mais elevadas.

Em estudos envolvendo CAA, Garcia-Troncoso *et al.* (2021) compararam o uso de diferentes tipos de resíduos (concreto, cerâmica vermelha e bloco de concreto) nas misturas submetidas a elevadas temperaturas. Dentre os materiais utilizados na pesquisa como agregado graúdo, o agregado de RCV apresentou a maior absorção de água e porosidade. Os resultados também revelaram que o CAA contendo RCV superou a resistência à compressão do concreto de referência nas temperaturas de 400 e 600°C, além de ser a única mistura que não sofreu *spalling* explosivo ao atingir a temperatura de 800 °C. Semelhantemente, Alizadeh *et al.* (2021) investigaram o comportamento residual mecânico do CAA com RCV como agregado graúdo após aquecimento em cinco patamares de temperatura diferentes (110, 200, 400, 600 e 800°C). Os resultados indicaram que a resistência à compressão do CAA contendo 50% de RCV superaram o concreto referência para as temperaturas superiores a 400°C.

Alcharchafche, Al-mashhadani e Aygörmez (2022) investigaram as propriedades mecânicas e de durabilidade de compósitos de cimento branco com adição de *filler* de RCV. Os corpos de prova foram submetidos a três patamares de temperatura diferentes (250, 500 e 750°C). Os resultados revelaram que o uso de 5% de *filler* de RCV aumentou os valores de resistência em comparação ao concreto de referência, ao passo que o uso de 15% diminuiu a resistência à compressão. Adicionalmente, verificou-se que o uso de *filler* de RCV aumentou os valores de resistência ao ser submetido a temperatura de 250°C em comparação à resistência em temperatura ambiente. Na Figura 4 são apresentadas as curvas de resistência normalizadas em função da temperatura, conforme observado pelos pesquisadores.

Figura 4 – Curvas de resistência à compressão normalizada em função da temperatura



Fonte: elaborado pelo autor.

Apesar da cerâmica vermelha permanecer estável a elevadas temperaturas, a sua porosidade, bem como o efeito de pozolanicidade e *filler* também podem influenciar nas propriedades mecânicas do concreto quando submetido a elevadas temperaturas. As propriedades de absorção de água do RCV podem estar relacionadas às proporções de finura e substituição na matriz. De acordo com Li *et al.* (2019), as características de absorção de água refletem o volume e conectividade dos poros em matrizes cimentícias. Portanto, sua determinação é importante para o CAA. Na Tabela 2 são apresentados estudos relacionados ao uso do RCV em concretos e argamassas autoadensáveis, em diferentes granulometrias.

O trabalho de Amjadi *et al.* (2017) revelou que a absorção de água nos corpos de prova de argamassa autoadensável aumentou após a substituição do cimento por 5 a 15% de RCV. Além disso, notou-se que a taxa de absorção cresceu proporcionalmente ao percentual de substituição. Em estudos semelhantes, Zhao *et al.* (2021) substituíram o *filler* de calcário por 50 e 100% de *filler* de RCV, e constataram que os níveis de absorção de água foram semelhantes para os diferentes teores de RCV incorporados nas misturas. Além disso, a absorção de água dos corpos

de prova com RCV assemelhou-se à da argamassa com *filler* de calcário. De igual forma, Si-Ahmed e Kenai (2020) mostraram que o *filler* de RCV aumentou ligeiramente a absorção capilar de água do CAA em comparação com as misturas sem cerâmica.

Tabela 2 – Estudos sobre agregado de RCV

Autor	Tipo de compósito	Granulometria	Absorção de água do RCV	Absorção de água do corpo de prova	Substituição máxima na matriz (%)	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)
Achak, Sohrabi e Hoseini (2023)	CAA	AG	5,6	7%	50	31
Harikaran <i>et al.</i> (2023)	CAA	AM	1,82	3%	100	42
Meillyta, Wahyuni e Fahmi (2023)	CAA	AG	4,78	NC	75	23,52
Alizadeh <i>et al.</i> (2021)	CAA	AG	2,1	NC	50	48,09
Ge <i>et al.</i> (2021)	CAA	AM	15,7	NC	100	50,8
Garcia-Troncoso <i>et al.</i> (2021)	CAA	AG	14,44	12%	100	54
Shah, M. <i>et al.</i> (2021)	CAA	<i>Filler</i>	NC	11%	20	71
Zhao <i>et al.</i> (2021)	AAA	<i>Filler</i>	11,3	12%	100	40
Zhang <i>et al.</i> (2021)	CAA	AM	5	NC	100	51
Silva, Lange e Delvasto (2019)	CAA	<i>Filler</i>	NC	7,33%	42,56	26
Jerônimo, Meira e Silva Filho (2018)	CAA	<i>Filler</i>	NC	5,2%	40	47
Santos (2018)	CAA	<i>Filler</i>	NC	0,22/ 0,21/ 0,71/ 0,73 g/cm <sup>2</sup>	14/11,84/14,2 2/18,91	35,67/29,82/1 8,53/17,6
Abdulrazzaq (2017)	CAA	<i>Filler</i>	26,6	NC	15	26
Amjadi <i>et al.</i> (2017)	AAA	<i>Filler</i>	32	6,8%	15	32,00

AAA: Argamassa autoadensável      AG: Agregado graúdo      AM: Agregado miúdo      NC: Não consta

Fonte: elaborado pelo autor.

Em estudos sobre CAA, Shah, M. *et al.* (2021) demonstraram que a substituição de cimento em 5, 10 e 20% por RCV como *filler* reduziu a absorção de água do concreto, o que indicou que as misturas com RCV são menos porosas e mais duráveis do que as misturas que não a contêm. Esses resultados podem estar atrelados à granulometria do RCV utilizada, na qual foi mais fina que a do cimento substituído na matriz, contribuindo mais para o refinamento dos poros. De

igual forma, Jerônimo, Meira e Silva Filho (2018) investigaram a substituição do cimento por 20 a 40% de *filler* de RCV, e constataram que o uso do resíduo contribuiu para a diminuição da porosidade e o índice de absorção de água dos concretos, constatando que os resultados podem estar atrelado ao efeito pozolânico do resíduo, que se torna mais pronunciado ao longo do tempo. Silva, Lange e Delvasto (2019) observaram que a absorção de água das misturas com *filler* de RCV aumentou até 28 dias em relação à amostra de referência. Porém, em idades mais avançadas, com o progresso da cura, a absorção de água diminuiu devido ao processo de hidratação. Adicionalmente, Santos (2018) investigou a utilização de diferentes tipos de resíduo como *filler* no CAA com diferentes tipos de traços. O autor concluiu que os traços mais pobres absorveram mais água que os ricos e que essa tendência está diretamente relacionada com a porosidade da matriz. Ademais, dentre todas as misturas estudadas, aquelas que utilizaram RCV obtiveram absorção mais elevadas em relação aos demais tipos de resíduos investigados. Semelhantemente, Harikaran *et al.* (2023) constataram que quanto maior a porcentagem de RCV utilizado na mistura, maior foi a porosidade do concreto preservado ao ar livre.

Ge *et al.* (2021) ao estudarem o CAA com RCV, observaram que o agregado miúdo de RCV tem maior capacidade de absorção de água em comparação ao agregado natural. Para um mesmo módulo de finura, a absorção de água do RCV foi de 15,7%, enquanto a absorção de água do agregado natural foi de 1,8%. Ainda, quando compararam o CAA feito com agregado de RCV em substituição ao agregado natural, os autores observaram que a umidade relativa interna da amostra aumentou em 13 e 11,2 %, a 2,5 mm e 10 mm de profundidade, respectivamente, após 90 dias de secagem.

Embora a porosidade possa levar a uma redução da resistência à compressão, é importante notar que o RCV pode apresentar características pozolânicas, o que lhe confere a capacidade de hidratar a pasta de concreto a longo prazo, contribuindo para o desenvolvimento de uma resistência à compressão satisfatória. Ma e Wang (2013) verificaram que as taxas de substituição entre 10% e 30% do *filler* de RCV tiveram impacto mínimo na resistência mecânica do concreto. Além disso, a pesquisa conduzida por Yu *et al.* (2019) evidenciou que os efeitos de cura interna das misturas com *filler* de RCV também contribuíram positivamente para o desenvolvimento de propriedades a longo prazo, como a resistência à compressão. Ma *et al.* (2019, 2020) de igual forma constataram que quantidades adequadas de *filler* de RCV poderiam melhorar a durabilidade a longo prazo de materiais à base de cimento, melhorando a resistência

à permeabilidade aos íons cloreto (<30%) e a resistência ao ciclo de congelamento-descongelamento.

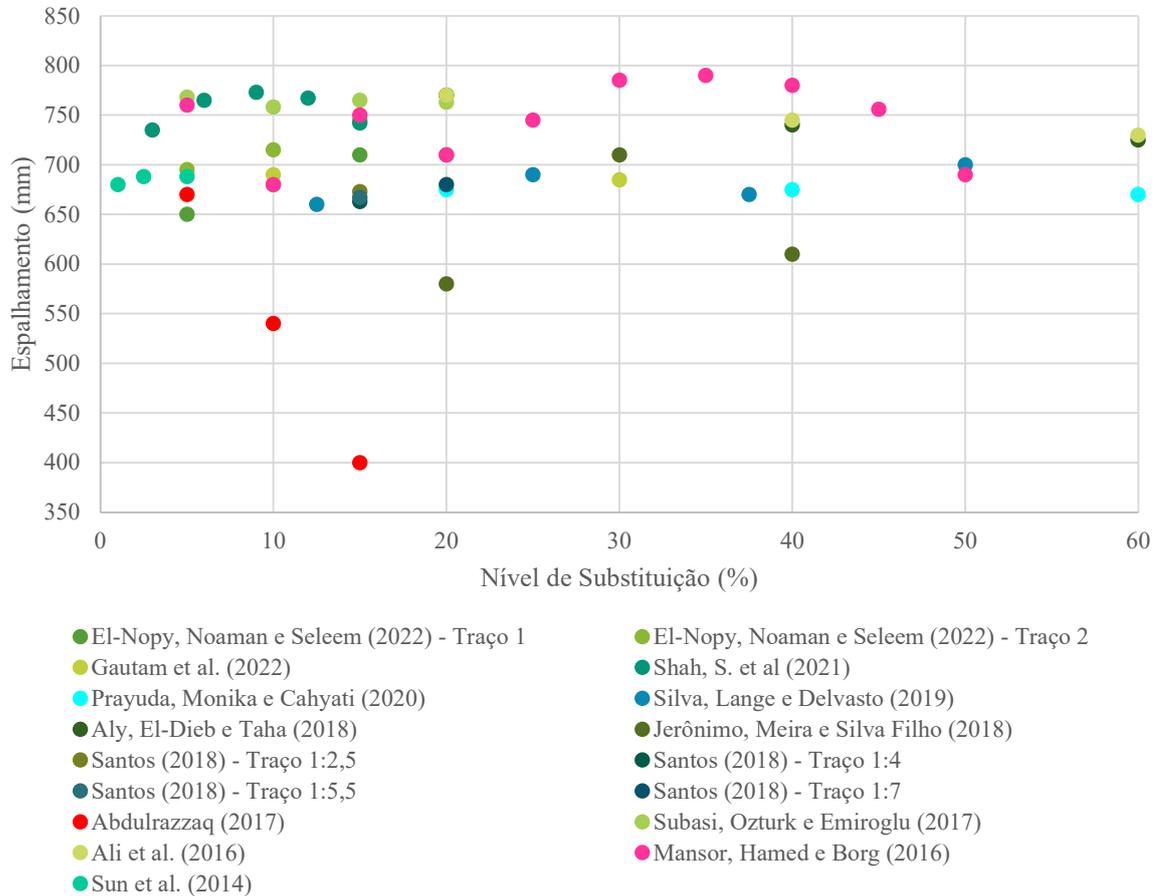
Naceri e Hamina (2009) relataram que o *filler* de RCV compartilha propriedades semelhantes com outros materiais cimentícios suplementares, tais como um alto teor de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, efeitos pozolânicos e capacidade de *filler* dos microagregados. Os autores constataram ainda que, embora a incorporação de *filler* de RCV tenha impactos adversos no desempenho mecânico inicial do concreto, teores substanciais de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub> contribuíram positivamente para a formação de C-S-H, conseqüentemente melhorando a resistência mecânica do concreto a longo prazo. De igual forma, Ma *et al.* (2020) concluíram que, à medida que a finura do RCV em pó aumentava, sua capacidade pozolânica também se intensificava. Além disso, observaram que, quando a finura do RCV moído superava a do cimento, as propriedades mecânicas da argamassa superavam as da argamassa convencional. Ainda, He, Ziming *et al.* (2021) observaram que a quantidade adequada de pó de RCV (15%) pode exercer o efeito *filler* e atividade pozolânica, melhorando assim as propriedades mecânicas do concreto de ultra-alto desempenho. Os autores constataram um aumento da resistência à compressão e flexão aos 28 dias em 1,56% e 1,69%, respectivamente, em relação ao concreto de referência.

Quanto às propriedades no estado fresco, o CAA com *filler* de RCV tem sido investigado por diversos pesquisadores. Na Figura 5 são apresentados os resultados de espalhamento no estado fresco encontrados para o CAA em função da porcentagem de RCV adicionada na mistura.

Sun *et al.* (2014) relataram que o uso de RCV em até 5% do peso do cimento não afetou o fluxo de abatimento onde todos os valores foram superiores a 670 mm. Mansor, Hamed e Borg (2016) verificaram que a estabilidade e a trabalhabilidade do CAA fresco foram melhoradas após a substituição do cimento por *filler* de RCV. Silva, Lange e Delvasto (2019) relataram que o RCV pode substituir o cimento na faixa de 12,5 a 50% para produzir concretos com boa autocompactação e trabalhabilidade. Já El-Nopy, Noaman e Seleem (2022) verificaram que aumentar a proporção de *filler* de RCV de 0 a 20% levou a um acréscimo no espalhamento e concluiu que a mistura melhorou a fluidez e a habilidade passante do CAA em comparação com o concreto de referência. Subasi, Ozturk e Emiroglu (2017) também verificaram uma melhoria nas propriedades de fluidez com a incorporação de *filler* de RCV em comparação com a mistura de referência. Aly, El-Dieb e Taha (2019) constataram que, embora os resultados do

espalhamento tenham diminuído à medida que a quantidade de RCV na mistura aumentou, essa redução não foi significativa, com a diferença não excedendo 5%.

Figura 5 – Influência do *filler* de RCV na trabalhabilidade do CAA



Fonte: elaborado pelo autor.

Em contrapartida, Santos (2018), ao substituir a areia por *filler* de RCV, constatou a necessidade de uma maior quantidade de água adicionada na mistura durante a dosagem para alcançar a mesma trabalhabilidade, e isso se deve à natureza lamelar do resíduo. Semelhantemente, Ali *et al.* (2016) observaram uma redução na fluidez do concreto, atribuindo-a à forma irregular das partículas de cerâmica. Além disso, Shah, S. *et al.* (2021) constataram que substituições acima de 15% do cimento por RCV levaram a uma redução significativa da trabalhabilidade. Adicionalmente, os autores concluíram que uma faixa de substituição de 9 a 12% proporcionou os melhores resultados em termos de trabalhabilidade.

Por fim, todos os autores, com exceção de Abdulrazzaq (2017), cujos resultados para substituições acima de 10% foram insatisfatórios, conseguiram encontrar valores apropriados para o espalhamento, em acordo com os limites estabelecidos pelas normativas.

### 2.3 PESQUISAS SOBRE CONCRETOS EXPOSTOS A ELEVADAS TEMPERATURAS DESENVOLVIDAS NO LEME

Diversas pesquisas relacionadas ao concreto exposto a elevadas temperaturas vêm sendo desenvolvidas ao longo dos últimos anos no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). Dentre elas, citam-se como exemplo, as dissertações de mestrado elaborados por Wendt (2006), Caetano (2008), Ruschel (2011), Ferreira (2019) e Franchetto (2022); as teses de doutorado de Lima (2005), Kirchhof (2010), Souza (2014) e Almeida (2017) e; os diversos trabalhos de conclusão de curso de Biazetto (2018), Bidinotto (2018), Marques (2018), Nunes (2018), Padilha (2019) e Perin (2019).

Lima (2005) investigou o comportamento de concretos em temperaturas elevadas e avaliou as alterações microestruturais e as perdas de resistências de pastas, argamassas e concretos em virtude das elevadas temperaturas. Além disso, o autor avaliou o comportamento de concretos com elevada compacidade frente as elevadas temperaturas, constatando que a compacidade é uma característica determinante para a ocorrência de deslocamentos explosivos. Entretanto, o autor observou que, adotadas medidas para controlar o deslocamento explosivo, os concretos de alta compacidade podem apresentar um comportamento mais adequado durante a exposição a elevadas temperaturas do que os concretos de resistência convencional.

Kirchhof (2010) averiguou quais as propriedades mecânicas residuais e as alterações na microestrutura sofridas por concretos em diferentes patamares de resistência submetidos a elevadas temperaturas, analisou também as condições que favorecem o *spalling* explosivo. Os resultados indicaram que a ocorrência de *spalling* explosivo acarreta a perda de seção transversal e conseqüente redução do tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). Ainda, o estudo constatou que ao analisar concretos com maior resistência e compacidade, a probabilidade de ocorrência de *spalling* explosivo se torna mais frequente, especialmente quando a umidade atinge a faixa de 90 a 100%.

Souza (2014) investigou a influência do nível de carga, tipo de agregado graúdo, saturação e classe de resistência nas propriedades mecânicas residuais do concreto (resistência à

compressão, módulo de elasticidade e absorção de água) após ser submetido à ação das elevadas temperaturas. A partir do estudo, o autor conclui que os concretos de alta resistência são mais suscetíveis à redução de resistência que os concretos de resistência convencional. Além disso, ele constatou que a perda de massa, principalmente pela ocorrência de *spalling*, foi maior nos concretos de alta resistência, provocando redução da resistência à compressão.

Na investigação de Almeida (2017) sobre concretos convencionais e concretos com cinza de casca de arroz, constatou-se que a temperatura de exposição desempenhou o papel mais significativo na influência dos resultados. O estudo também observou que a massa, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade diminuíram à medida que as temperaturas de exposição aumentaram, principalmente para temperaturas superiores a 400°C.

Franchetto (2022) analisou os efeitos da exposição do CAA a elevadas temperaturas sobre as características físicas e propriedades mecânicas residuais. O estudo do autor foi o precursor a avaliar o CAA a elevadas temperaturas dentro do LEME e a presente pesquisa foi desenvolvida com o objetivo dar continuidade e complementar o seu trabalho. A pesquisa do autor considerou 3 famílias de concreto: concreto convencional de referência, o concreto autoadensável produzido através da substituição por *filler* não pozolânico e o concreto autoadensável produzido com aditivo modificador de viscosidade. Os resultados encontrados indicaram que, tomadas as precauções para impedir a ocorrência de *spalling*, o concreto autoadensável possui o comportamento semelhante ao do concreto convencional.

Sendo assim, a presente pesquisa objetiva dar continuidade aos conhecimentos já desenvolvidos na área, bem como contribuir com o estudo sobre o comportamento do CAA em elevadas temperaturas, através da utilização de *filler* de RCV. Espera-se que a incorporação do *filler* de RCV na mistura ocasione a diminuição da ocorrência do fenômeno de *spalling* e contribua positivamente nas propriedades mecânicas residuais.

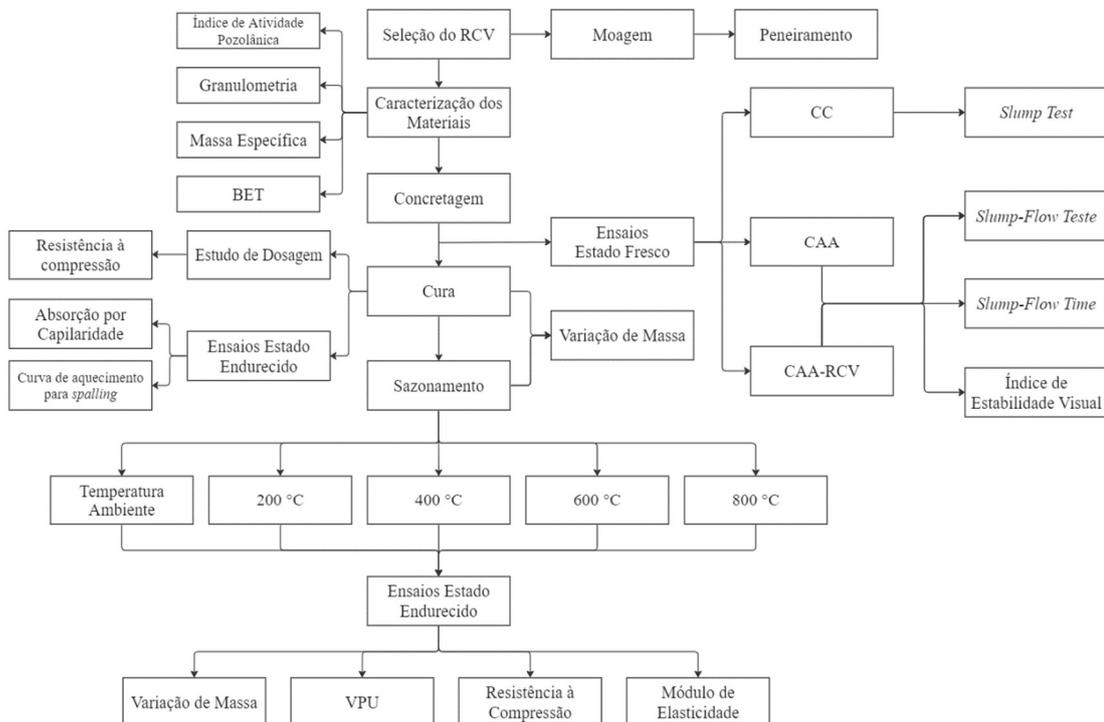
### 3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta o método que será seguido para o desenvolvimento desta pesquisa, incluindo o programa experimental, os materiais utilizados, as variáveis controláveis e não controláveis, os procedimentos de produção, cura, armazenagem, aquecimento e ensaios empregados no presente estudo.

#### 3.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental deste trabalho foi desenvolvido no LEME e consiste na análise das propriedades mecânicas residuais e das propriedades físicas do CAA-RCV quando exposto a patamares de temperatura entre 200 e 800°C, além das propriedades na temperatura ambiente. A Figura 6 consiste no processo adotado nesse programa experimental no formato de organograma. Ademais, ao final do programa experimental, é feita uma análise do impacto no custo da produção do concreto ao utilizar o RCV como *filler*.

Figura 6 – Organograma do Programa Experimental



Fonte: elaborado pelo autor.

A fim de possibilitar a verificação da eficiência do uso de *filler* de RCV no CAA sob efeito de elevadas temperaturas, foram produzidas três famílias de concreto. A primeira mistura consistiu em um concreto convencional a título de referência (CC); a segunda família consistiu em um concreto autoadensável com substituição do agregado miúdo por *filler* não pozolânico (CAA) e; a terceira, em um concreto autoadensável com substituição do agregado miúdo por *filler* de resíduo de cerâmica vermelha (CAA-RCV).

Primeiramente, realizou-se o processo de produção do RCV e a caracterização dos materiais utilizados. Após a investigação dos materiais, iniciou-se a etapa de dosagem, a qual envolveu a produção de três traços (1:3,5 – rico; 1:5 – intermediário, 1:6,5 – pobre) para cada família de concreto analisada e teve como objetivo principal desenvolver as curvas de dosagem para caracterização dos concretos utilizados na pesquisa. Foram rompidos dois corpos de prova em cada idade para cada família de concreto e os fatores controláveis e os níveis adotados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Fatores controláveis e níveis para a etapa de dosagem

Fatores Controláveis	Níveis
Famílias	CC/CAA/CAA-RCV
Idades (dias)	3/ 7/ 28/ 63
Traços	1:3,5/ 1:5/ 1:6,5
Ensaio Destrutivos	Resistência à compressão
Corpos de prova por ensaio	2
Total	72

Fonte: elaborado pelo autor.

Após a dosagem, a pesquisa prosseguiu com a análise dos corpos de prova sob exposição a temperaturas elevadas. Devido aos prazos da pesquisa, nessa etapa, prosseguiu-se com os ensaios exclusivamente no traço intermediário. Os corpos de prova foram subdivididos em dois grupos, o primeiro grupo foi submetido a cinco patamares de temperaturas distintas de exposição, sendo eles a temperatura ambiente, 200°C, 400°C, 600°C e 800°C e o segundo grupo foi submetido a uma elevada taxa de aquecimento com uma única temperatura máxima de 1000°C, com o objetivo verificar a possibilidade de ocorrer *spalling*. Os fatores controláveis e os níveis adotados para a pesquisa estão descritos na Tabela 4, que também fornece número total de corpos de prova produzidos.

Tabela 4 – Fatores controláveis e níveis para a pesquisa

Fatores Controláveis	Níveis
Famílias	CC/CAA/CAA-RCV
Idades (dias)	70 (7+63)
Traço	1:5
Temperaturas (°C)	Ambiente/ 200/ 400/ 600/ 800
Ensaio Destrutivos	Curva de aquecimento para investigação de <i>spalling</i>
Ensaio Destrutivos	Resistência à compressão/ Módulo de elasticidade
Corpos de prova por ensaio	3
Total	99

Fonte: elaborado pelo autor.

Adicionalmente, foram produzidos 3 corpos de prova de cada família de concreto para que pudesse avaliar a absorção de água por capilaridade, totalizando 108 corpos de prova.

Os corpos de prova do primeiro grupo foram mantidos em câmara úmida por 7 dias e, após esse período, eles foram conservados por mais 63 dias em temperatura e umidade controlada ( $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e UR=50%), de forma que a umidade nos corpos de prova não ocasionasse a degradação prévia do material por *spalling* explosivo, permitindo assim a realização dos ensaios de propriedades residuais. Esses corpos de prova foram submetidos aos ensaios não destrutivos (VPU) e destrutivos (compressão e módulo de elasticidade). O segundo grupo de corpos de prova foi mantido em câmara úmida até a idade de 70 dias e, após esse período, foram levados ao forno a uma elevada taxa de aquecimento de  $27^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de  $1000^{\circ}\text{C}$ , para verificar a ocorrência de *spalling* (ensaio conduzido de forma complementar e unicamente com o propósito de realizar uma avaliação preliminar e qualitativa do fenômeno de *spalling*).

## 3.2 MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais empregados para a produção dos corpos de prova, bem como as respectivas caracterizações.

### 3.2.1 Água

Utilizou-se água da rede de abastecimento local, fornecida pelo DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgoto). Dados publicados referentes a janeiro de 2023 (período no qual ocorreram as concretagens da presente pesquisa) indicam pH de 6,4 e cloro residual livre de  $0,92\text{ mgCl}_2/\text{l}$  (DMAE, 2023).

### 3.2.2 Cimento

Para a produção dos concretos, empregou-se o cimento Portland CP V-ARI, cimento de alta resistência inicial. A escolha desse material decorreu de sua pureza superior em relação a outros cimentos disponíveis no mercado, uma vez que contém uma menor quantidade de adições minerais pozolânicas em sua composição, tornando-o mais representativo para a efetivação dos resultados da pesquisa.

O cimento CP V-ARI foi caracterizado de acordo com as prescrições normativas vigentes e os resultados informados foram obtidos a partir do “Boletim de Ensaios de Cimento” emitido pelo Laboratório Técnico da Fábrica de Vidal Ramos – SC, local de onde originou o lote de cimento utilizado. São apresentados os ensaios químicos, ensaios físicos, e ensaios mecânicos na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, respectivamente.

Tabela 5 – Ensaios químicos – Votorantim Cimentos

Ensaio	Metodologia	Limite da Norma (%)	Resultado (%)
Perda ao Fogo (PF)	ABNT NBR 17086-6	≤ 6,5	4,38
Óxido de Magnésio (MgO)	ABNT NBR 17086-2	Não especifica	6,05
Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	ABNT NBR 17086-5	≤ 4,5	2,52
Resíduo Insolúvel (RI)	ABNT NBR 17086-4	Não especifica	10,45

Fonte: adaptado de Votorantim (2023).

Tabela 6 – Ensaios físicos – Votorantim Cimentos

Ensaio	Metodologia	Limite da Norma	Resultado	Unidade
Finura #200	ABNT NBR 11579	≤ 6	0	%
Finura #400	-	Não especifica	0,3	%
Massa específica	ABNT NBR 16605	Não especifica	3,02	g/cm <sup>3</sup>
Área específica (Blaine)	ABNT NBR 16372	Não especifica	5.017	cm <sup>2</sup> /g
Água de consistência da pasta	ABNT NBR 16606	Não especifica	29,64	%
Início de pega	ABNT NBR 16607	≥ 60	252	Min
Fim de pega	ABNT NBR 16607	≤ 600	297	Min
Expansibilidade à quente	ABNT NBR 11582	≤ 5	0,3	Mm

Fonte: adaptado de Votorantim (2023).

Tabela 7 – Ensaio mecânicos – Votorantim Cimentos

Resistência à compressão	Metodologia	Limite da Norma (MPa)	Resultado (MPa)
1 dia	ABNT NBR 7215	$\geq 14$	21,6
3 dias	ABNT NBR 7215	$\geq 24$	32,9
7 dias	ABNT NBR 7215	$\geq 34$	37,6
28 dias	ABNT NBR 7215	Não especifica	45,5

Fonte: adaptado de Votorantim (2023).

### 3.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem basáltica, limitado ao diâmetro máximo de 12,5 mm, processado em britador de impacto vertical (VSI) na etapa final do circuito de britagem, resultando em um agregado com formato mais cúbico. O agregado passou por um processo de lavagem a fim de remover quaisquer impurezas ou materiais pulverulentos que pudesse estar presente e, posteriormente, foi exposto ao ar livre para secagem.

A caracterização do agregado seguiu o prescrito pelas normas NBR 16917 (ABNT, 2021c), para a massa específica aparente e absorção de água, e NBR 17054 (ABNT, 2022b), para composição granulométrica. A densidade e absorção de água do agregado graúdo estão apresentadas na Tabela 8, a composição granulométrica ensaiada durante a pesquisa e a ensaiada na pedreira são apresentadas na Tabela 9 e as respectivas curvas granulométricas e os limites da zona utilizável conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022a) na Figura 7.

Tabela 8 – Densidade e absorção de água do agregado graúdo

$\rho_s$ - densidade do agregado na condição seca	2,89 g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{sss}$ - densidade do agregado na condição saturada superfície seca	2,94 g/cm <sup>3</sup>
Abs – Absorção de água	1,7%

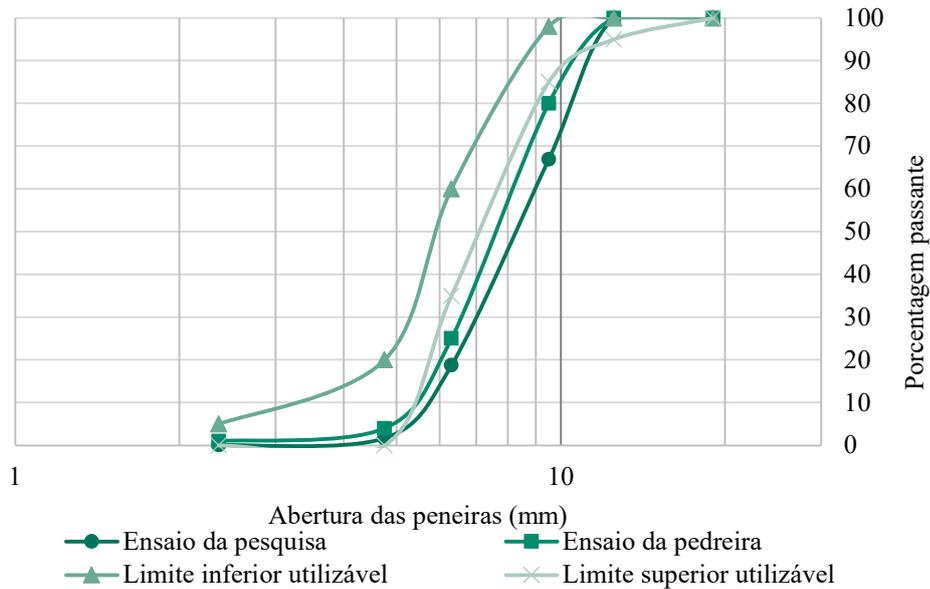
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 9 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Abertura da Peneira (mm)	Ensaio Próprio da Pesquisa		Ensaio da Pedreira	
	% Retida Média	% Retida Acumulada	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 12,5	0	0	0	0
# 9,5	33	33	20	20
# 6,3	48	81	55	75
# 4,75	17	98	21	96
# 2,36	2	100	3	99
Módulo de Finura	6,31		6,15	
Dimensão Máxima Característica	12,5		12,5	

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 7 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.4 Agregado miúdo

No presente estudo foi utilizada uma areia natural quartzosa como agregado miúdo em todas as famílias de concreto produzidas. A areia natural é proveniente da beira de rios das Bacias Hidrográficas do Baixo Jacuí e Bacia Hidrográfica do Lago Guaíba e comercializada a granel no município de Porto Alegre.

A densidade e a capacidade de absorção de água foram avaliadas de acordo com o método descrito na norma NBR 16916 (ABNT, 2021b), e os resultados são apresentados na Tabela 10. A caracterização física dessa areia foi realizada de acordo com as prescrições normativas da NBR 17054 (ABNT, 2022b), o resultado da composição granulométrica é apresentado na Tabela 11 e a curva granulométrica na Figura 8.

Tabela 10 – Densidade e absorção de água do agregado miúdo

$\rho_s$ - densidade do agregado na condição seca	2,60 g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{sss}$ - densidade do agregado na condição saturada superfície seca	2,62 g/cm <sup>3</sup>
Abs – Absorção de água	0,8%

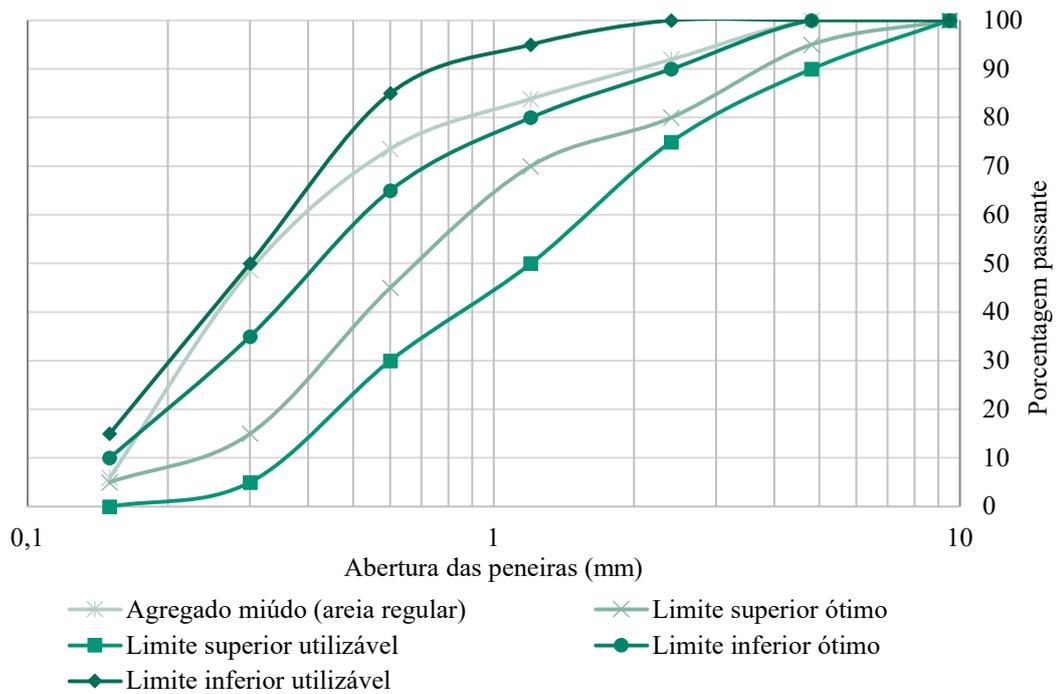
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Composição granulométrica do agregado miúdo

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	8	8
# 1,18	8	16
# 0,60	10	26
# 0,30	25	51
# 0,15	43	94
Módulo de Finura		1,96
Dimensão Máxima Característica		4,75 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.5 Filler não pozolânico

O material utilizado como *filler* não pozolânico para a produção do CAA de referência foi a areia extraída de jazidas quartzosas e quartzo-feldspáticas localizada no município de Osório. Essa areia é comercializada em sacos de 20kg, já peneiradas e não contém matéria orgânica em sua composição.

A densidade e a absorção de água foram determinadas conforme diretrizes na norma NBR 16916 (ABNT, 2021b), e os resultados são apresentados na Tabela 12. A caracterização do agregado foi realizada de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma NBR 17054 (ABNT, 2022b), a granulometria do *filler* de areia está detalhada na Tabela 13.

Tabela 12 – Densidade e absorção de água do *filler* de areia

$\rho_s$ - densidade do agregado na condição seca	2,58 g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{SSS}$ - densidade do agregado na condição saturada superfície seca	2,59 g/cm <sup>3</sup>
Abs – Absorção de água	0,4%

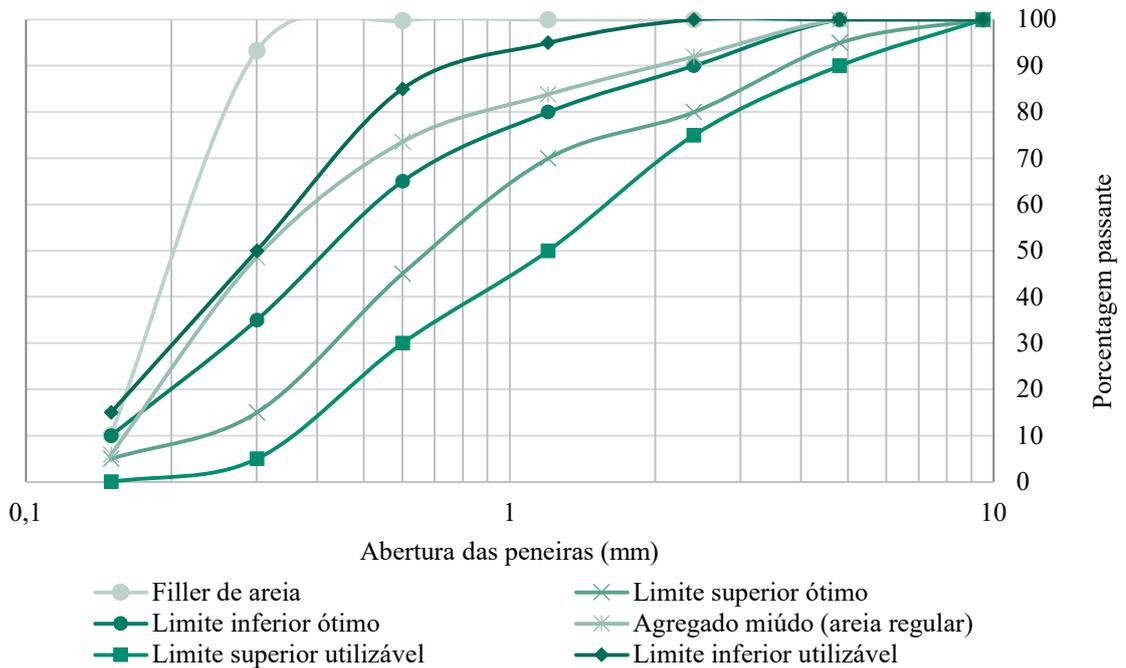
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Composição granulométrica do *filler* de areia

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	0	0
# 1,18	0	0
# 0,60	0	0
# 0,30	7	7
# 0,15	83	90
Módulo de Finura		0,97
Dimensão Máxima Característica		0,6 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 9 a curva de composição granulométrica do *filler* de areia é apresentada. Conforme preconiza Tutikian (2004), a fração de *filler*, quando incorporada ao CAA, deve apresentar uma área superficial maior do que a do componente que está sendo substituído. Dessa forma, a curva granulométrica da areia regular foi incluída na Figura 9, com o propósito de possibilitar uma comparação visual direta entre as duas areias empregadas.

Figura 9 – Distribuição granulométrica do *filler* de areia

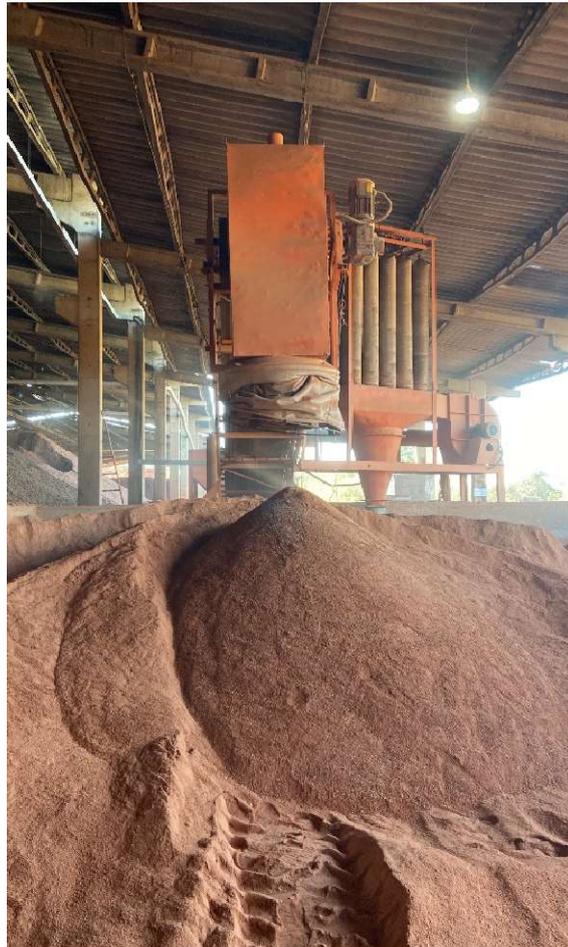
Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.6 Resíduo de cerâmica vermelha (RCV)

No estudo, foi investigada a utilização de RCV de origem industrial, provenientes de uma indústria de cerâmica da região de Porto Alegre. Esse material é submetido a um processo de reaproveitamento pela fábrica: quando ocorrem quebras durante o processo de fabricação ou transporte, os resíduos são coletados e submetidos a moagem e processamento, conforme ilustrado na Figura 10. A indústria reintegra esses resíduos na produção de novos tijolos, seguindo uma proporção de composição de 2%. Entretanto, a porcentagem de reaproveitamento é muito pequena comparada à quantidade de material avariado. Segundo Garcia *et al.* (2015), as fábricas de tijolo cerâmico podem chegar a perder 220 toneladas de cerâmica por mês ainda na linha de produção.

O RCV foi utilizado como substituto da areia regular, com uma área superficial maior do que a do agregado no qual foi substituído (<0,60 mm). A descrição detalhada das características desse material é apresentada nos itens subsequentes.

Figura 10 – RCV coletado na fábrica

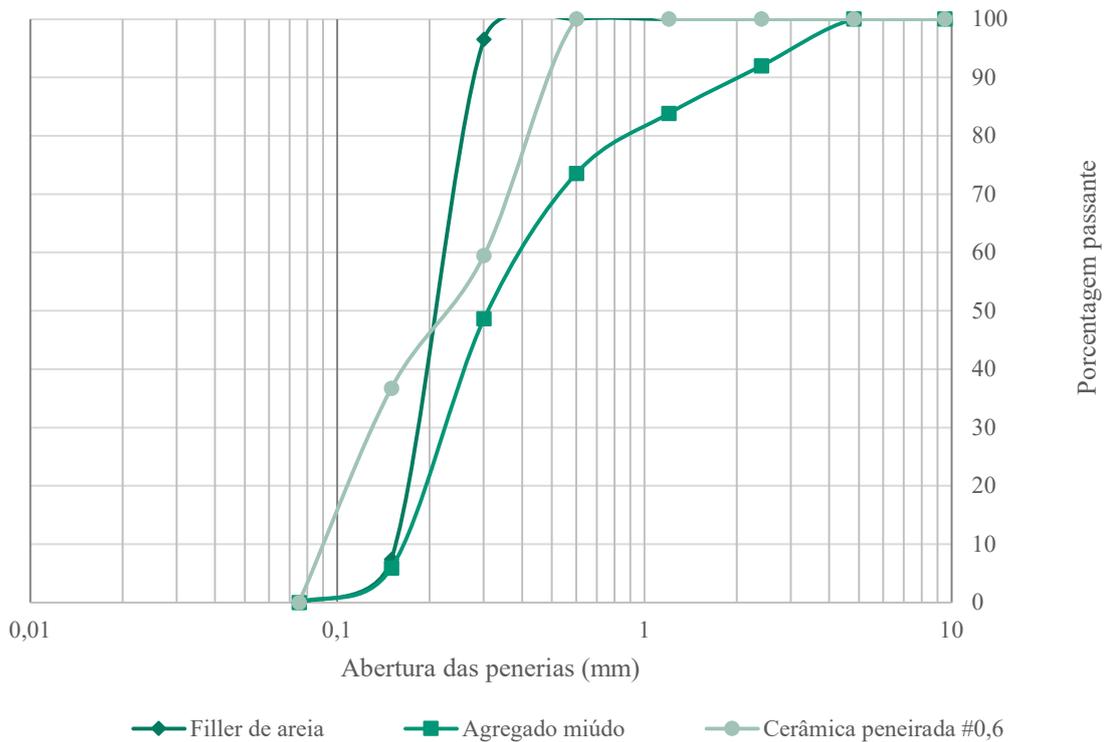


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 3.2.6.1 Composição granulométrica

Esta etapa consistiu na definição da curva granulométrica ideal de RCV moído a ser adicionada ao CAA como *filler*. Com base nos resultados de granulometria encontrados para a areia utilizada como *filler* no CAA e a areia regular na qual seria substituída, foram realizadas diversas combinações de processo de moagem para o RCV. Embora o RCV já tenha sido coletado parcialmente moído na indústria, apresentava uma curva granulométrica significativamente diferente da curva ideal necessária para seu uso como *filler* no CAA-RCV. Na Figura 11 é possível observar a composição granulométrica RCV que não passou por nenhum processo adicional de moagem além do que já havia sido submetido na indústria e apenas foi previamente peneirado na peneira de abertura #0,6mm.

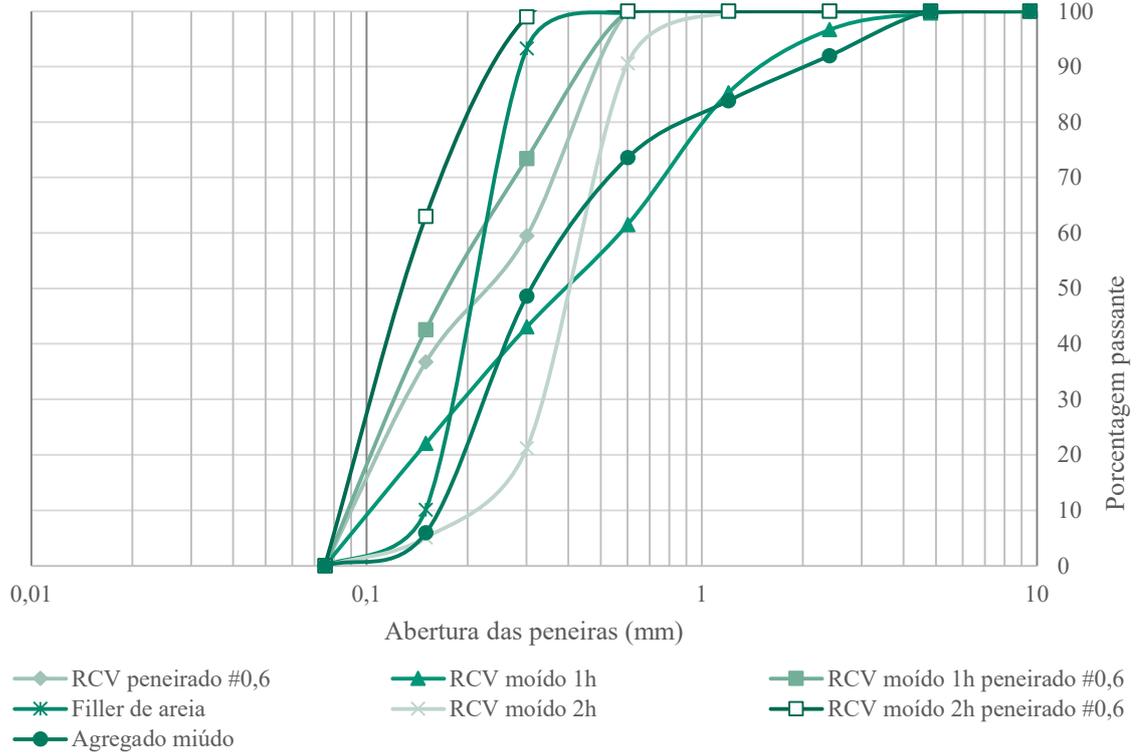
Figura 11 – Composição granulométrica do RCV peneirado #0,6mm



Fonte: elaborado pelo autor.

Devido aos resultados insatisfatórios da composição granulométrica mostrada na Figura 11, estabeleceram-se 5 diferentes composições granulométrica para o RCV: RCV peneirado na peneira de abertura #0,6mm; RCV moído por 1h; RCV moído por 1h e peneirado na peneira de abertura #0,6mm; RCV moído por 2h e; RCV moído por 2h e peneirado na peneira de abertura #0,6mm. A operação de moagem utilizou um moinho de bolas de cerâmica com potência de 70W modelo Groschopp VE31-D-B-2. Os resultados das composições granulométricas são ilustrados Figura 12 e os resultados dos ensaios realizados conforme os procedimentos da NBR 17054 (ABNT, 2022b) são apresentados no APÊNDICE A.

Figura 12 – Comparação das diferentes composições granulométricas do RCV



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados apresentados na Figura 12, optou-se por utilizar o RCV moído por 2h e peneirado na peneira de abertura #0,6mm como *filler* no CAA-RCV. Dessa forma, foi alcançado o objetivo de produzir um material alternativo ao *filler* utilizado no CAA, com módulo de finura e dimensão máxima característica inferiores. Além disso, sua curva granulométrica foi a melhor composição encontrada para a elaboração do CAA, de forma a garantir que a porção de *filler* corroboraria para o concreto não segregar e atingir a fluidez necessária para o CAA. A Figura 13 ilustra o aspecto final do RCV após a moagem e peneiramento.

Figura 13 – Aspecto do RCV



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.6.2 Caracterização física

A área superficial do *filler* de RCV foi determinada a partir do método da área superficial específica (BET), por meio da adsorção de gás nitrogênio. O resultado obtido para a área superficial do *filler* de RCV foi de 15,16 m<sup>2</sup>/g.

A massa específica foi realizada conforme procedimento normatizado pela NBR 16605 (ABNT, 2017c) e a absorção de água foi determinada conforme diretrizes na norma NBR 16916 (ABNT, 2021b). Os resultados observados em cada ensaio são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Caracterização física do RCV

BET	15,16 m <sup>2</sup> /g
Massa específica	2,48 g/cm <sup>3</sup>
Abs – Absorção de água	7,58%

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.6.1 Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

A avaliação do IAP foi realizada de acordo com a prescrição da NBR 5752 (ABNT, 2014a). Essa análise foi realizada com o objetivo de verificar a atividade pozolânica do RCV e a possibilidade de contribuir para melhorias nas propriedades mecânicas do concreto, uma vez

que o RCV pode variar sua pozzolanicidade conforme a sua finura e temperatura de queima operada durante a fabricação (Garcia *et al.*, 2015; Janotka; Martauz; Bacuvčík, 2021).

O IAP é calculado a partir da proporção entre a resistência à compressão da argamassa contendo RCV e a resistência à compressão da argamassa de referência, medida aos 28 dias. Os resultados dos ensaios de resistência à compressão foram obtidos a partir da média de 6 corpos de prova de cada argamassa e as médias são representadas na Tabela 15.

Tabela 15 – IAP do RCV

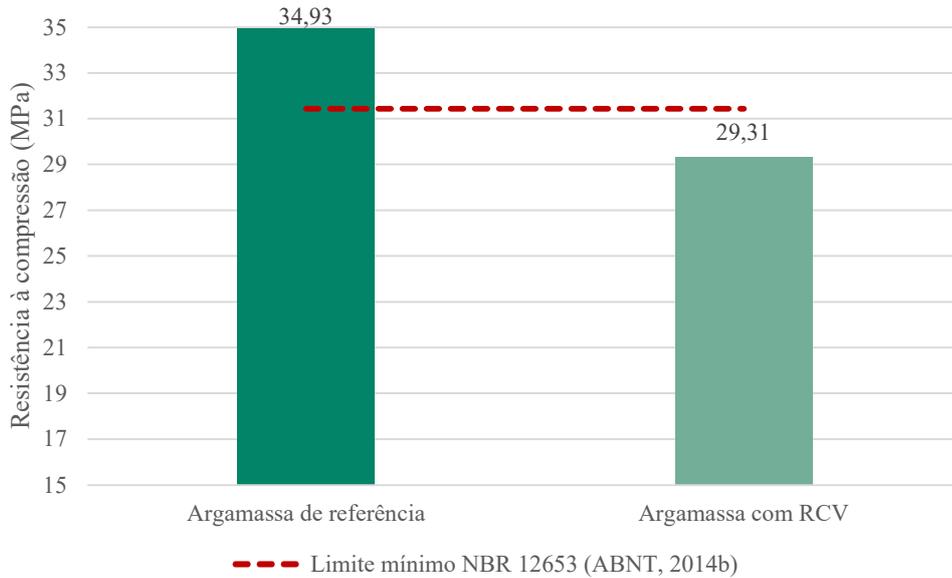
	<b>Resistência à compressão média (MPa)</b>	<b>IAP</b>
Argamassa de referência	34,93	
Argamassa com RCV	29,31	83,89 %

Fonte: elaborado pelo autor.

É importante destacar que o *filler* de RCV investigado não atende aos critérios mínimos estabelecidos pela NBR 12653 (ABNT, 2014b) para utilização como material cimentício suplementar em argamassas e concretos, uma vez que se encontra abaixo do valor especificado pela norma, que requer um índice igual ou superior a 90%, conforme ilustrado na Figura 14. Portanto, esse material é classificado como não pozzolânico. Todavia, de acordo com Jerônimo, Meira e Silva Filho (2018), resultados abaixo de 100% são esperados, uma vez que o teste é realizado aos 28 dias, quando o efeito pozzolânico ainda precisa de mais tempo para progredir. Nasr *et al.* (2023) afirmam que a proporção da fase vítrea no RCV é relativamente baixa, o que explica a fraca atividade pozzolânica observada em estágios iniciais.

Ademais, é fundamental destacar que, apesar do RCV não atingir a IAP mínima exigida pela NBR 12653 (ABNT, 2014b), na presente pesquisa o material foi comparado com um *filler* não pozzolânico (*filler* de areia), e sua influência no CAA-RCV em comparação ao CAA resulta em diferenças mais acentuadas.

Figura 14 – IAP do RCV



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2.7 Aditivo superplastificante

O aditivo superplastificante foi utilizado a fim de melhorar a fluidez do concreto, possibilitando a produção de concretos com maior trabalhabilidade, sem a necessidade de aumentar o teor de argamassa, o consumo de cimento ou a relação água/cimento.

O aditivo empregado foi o ADVA® 458, à base de policarboxilato e a sua caracterização está descrita na Tabela 16.

Tabela 16 – Caracterização do aditivo superplastificante

Produto	Aspecto	Cor	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
ADVA® 458	Líquido	Alaranjado	1,075-1,115

Fonte: GCP Applied Technologies Inc (2021).

## 3.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

### 3.3.1 Definição dos traços

Considerando que os materiais empregados nesse estudo são os mesmos investigados anteriormente por Franchetto (2022), com exceção do RCV, procurou-se seguir nessa pesquisa os mesmos traços estabelecidos pelo autor. Para o método de dosagem, foram investigados três traços para cada família de concreto (traço rico, intermediário e pobre).

### 3.3.2 Dosagem

Para a produção do CC, foi empregado o Método IPT/EPUSP (Helene; Terzian, 1992), no qual foi determinado o teor de argamassa utilizado, inclusive no CAA. No que diz respeito ao CAA e CAA-RCV, foi adotado o método desenvolvido por Tutikian (2004), no qual a autoadensabilidade é atingida pelo acerto de finos por substituição do agregado miúdo. A Tabela 17 apresenta a configuração de traços para o estudo de dosagem.

Tabela 17 – Proporção dos concretos para o estudo de dosagem

Designação	Proporção (1:m)
CC_3,5	Concreto convencional - traço rico (1:3,5)
CC_5	Concreto convencional - traço intermediário (1:5)
CC_6,5	Concreto convencional - traço pobre (1:6,5)
CAA_3,5	Concreto autoadensável com <i>filler</i> de areia - traço rico (1:3,5)
CAA_5	Concreto autoadensável com <i>filler</i> de areia - traço intermediário (1:5)
CAA_6,5	Concreto autoadensável com <i>filler</i> de areia - traço pobre (1:6,5)
CAA-RCV_3,5	Concreto autoadensável com <i>filler</i> de RCV - traço rico (1:3,5)
CAA-RCV_5	Concreto autoadensável com <i>filler</i> de RCV - traço intermediário (1:5)
CAA-RCV_6,5	Concreto autoadensável com <i>filler</i> de RCV - traço pobre (1:6,5)

Fonte: elaborado pelo autor.

A principal alteração do CC para o CAA nos traços utilizados diz respeito à utilização de aditivo superplastificante e à substituição, em massa, de parte da areia regular por um tipo de *filler*, com teor de substituição fixo.

### 3.3.3 Teor de argamassa

A determinação do teor de argamassa foi baseada no CC com traço intermediário (1:5). Nessa etapa, foram utilizados apenas cimento, agregados e água, sem a adição de *fillers* ou aditivos. O processo começou com 50% de argamassa, e os acréscimos foram feitos conforme necessário. O teor ideal de argamassa, em massa, foi estabelecido em 58% com base em avaliações visuais de acabamento, homogeneidade e à necessidade de produzir dois concretos autoadensáveis com base nesse mesmo teor. A Tabela 18 apresenta os valores obtidos na determinação do teor de argamassa a partir da dosagem do CC de traço intermediário.

Tabela 18 – Dosagem do traço intermediário seco em massa do CC

Teor (%)	Traço Unitário			Cimento (kg)		Areia (kg)		Brita (kg)
	c	a	b	Massa total	Acréscimo	Massa total	Acréscimo	
0,50	1,00	2,00	3,00	3,33	-	6,67	-	10,00
0,51	1,00	2,06	2,94	3,40	0,068	7,01	0,340	10,00
0,52	1,00	2,12	2,88	3,47	0,071	7,36	0,354	10,00
0,53	1,00	2,18	2,82	3,55	0,074	7,73	0,369	10,00
0,54	1,00	2,24	2,76	3,62	0,077	8,12	0,385	10,00
0,55	1,00	2,30	2,70	3,70	0,081	8,52	0,403	10,00
0,56	1,00	2,36	2,64	3,79	0,084	8,94	0,421	10,00
0,57	1,00	2,42	2,58	3,88	0,088	9,38	0,440	10,00
0,58	1,00	2,48	2,52	3,97	0,092	9,84	0,461	10,00
0,59	1,00	2,54	2,46	4,07	0,097	10,33	0,484	10,00
0,60	1,00	2,60	2,40	4,17	0,102	10,83	0,508	10,00

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.3.4 Processo de mistura

Foi utilizada uma betoneira intermitente de queda livre com eixo inclinado para a mistura dos materiais. Após a preparação da betoneira, os materiais para o CC foram adicionados seguindo a sequência a seguir:

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

Para o CAA e o CAA-RCV, o processo de mistura prosseguiu de acordo com a sequência a seguir:

- 7) Aditivo superplastificante;
- 8) Incorporação de *filler*.

### 3.3.5 Moldagem dos Corpos de Prova

Foram moldados corpos de prova cilíndricos de acordo com as diretrizes estabelecidas na NBR 5738 (ABNT, 2015). No caso dos corpos de prova do CC, a compactação foi realizada por meio de vibração mecânica. Já os corpos de prova de CAA e CAA-RCV não foram submetidos a nenhum processo de vibração, devido às suas propriedades intrínsecas. Os moldes utilizados são de aço e possuem diâmetro interno igual a 10 cm e altura igual a 20 cm. Para evitar aderência, os moldes foram revestidos com uma fina camada de óleo mineral.

### 3.3.6 Cura

Após 24h da moldagem dos corpos de prova, procedeu-se a desmoldagem. Subsequentemente, todos os corpos de prova foram levados à câmara úmida. Os corpos de prova referentes ao estudo de dosagem e à análise de ocorrência de *spalling* permaneceram na câmara úmida até a data da realização do respectivo ensaio. Os corpos de prova destinados ao estudo do comportamento a elevadas temperaturas permaneceram na câmara úmida por um período de 7 dias e então foram levados à câmara climatizada, conforme descrito no item a seguir. As condições da câmara permaneceram à temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa superior a 95%.

### 3.3.7 Sazonamento

Visto que a saturação dos corpos de prova pode ocorrer de forma mais intensa na superfície, deixando o interior da amostra mais úmido e que há maiores chances de ocorrer *spalling* explosivo devido ao refinamento dos poros, os corpos de prova destinados ao estudo das propriedades residuais foram submetidos a um período de armazenamento em condições controladas. Isso implicou numa temperatura de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de 50%, por um período de 63 dias.

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

As propriedades do CC no estado fresco foram avaliadas por meio do ensaio de determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, conforme prescrito na NBR 16889 (ABNT, 2020). Quanto às propriedades no estado fresco dos concretos autoadensáveis, foram conduzidos três ensaios, conforme explicado a seguir.

### 3.4.1 *Slump-flow Test (Slump-Flow Spread)*

Este ensaio tem o propósito de caracterizar a capacidade de espalhamento do concreto, ou seja, a habilidade do CAA fluir livremente sem segregar. A NBR 15823-1 (ABNT, 2017<sup>a</sup>) delimita a fluidez em três classes distintas, conforme Tabela 19. O limite mínimo necessário para que um concreto seja classificado como autoadensável é de 500 mm. Se o espalhamento for inferior a esse limite, indica que o concreto tem baixa fluidez e, nesse caso, é necessário incorporar mais água ou aditivos superplastificantes. O limite máximo é de 850 mm, e ultrapassá-lo pode levar à segregação do concreto, exigindo medidas para torná-lo mais coeso. Ademais, o método de ensaio é detalhado na NBR 15823-2 (ABNT, 2017b).

Tabela 19 – Limites de resultados para o slump flow test

Classe	SF1	SF2	SF3
Espalhamento (mm)	550 a 650	600 a 750	760 a 850

Fonte: adaptado da ABNT (2017a).

Este ensaio também possibilita a classificação quanto ao IEV (índice de estabilidade visual), que analisa a distribuição dos agregados graúdos na mistura, a distribuição da argamassa no perímetro e a exsudação. A classificação é feita conforme prescrição da NBR 15823-1 (ABNT, 2017a).

### 3.4.2 *Slump-flow T<sub>50cm</sub> Test*

Este ensaio é uma variação do *slump-flow test* e, de igual forma, seus parâmetros são delimitados pela NBR 15823-1 (ABNT, 2017a). A norma delimita a classificação de viscosidade aparente em VS1 para valores inferiores a 2 segundos e VS2 para valores superiores a 2 segundos. O procedimento para a realização deste ensaio é semelhante ao *slump-flow test*, tendo como características díspares a marcação de um círculo de 500 mm de diâmetro centrado na base e a necessidade de um cronômetro para a realização do teste.

## 3.5 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, os concretos foram submetidos a avaliações das propriedades mecânicas residuais. Além disso, devido à característica porosa do RCV, foi investigada também a sua capacidade da absorção de água por capilaridade, com o objetivo de verificar a durabilidade do concreto e estabelecer uma relação entre a porosidade do material e a possível redução da

ocorrência de *spalling* explosivo. As caracterizações realizadas no estado endurecido são detalhadas nos subitens a seguir.

### 3.5.1 Absorção de Água por Capilaridade

Como a absorção capilar é um dos principais mecanismos de transporte de água e vapor de água nas estruturas de concreto, ela é capaz de fornecer uma visão da estrutura porosa e características de permeabilidade das misturas de concreto. De acordo com Bao *et al.* (2023), a capacidade de absorção capilar de água do concreto está intimamente relacionada com a distribuição dos poros e a conexão das microfissuras no seu interior. Portanto, este ensaio foi realizado e seguiu os procedimentos estabelecidos na NBR 9779 (ABNT, 2012a). Adicionalmente, os corpos de prova tiveram suas laterais impermeabilizadas com tinta acrílica, de modo a evitar a molhagem de outras superfícies, conforme procedimento prescrito na literatura (Santos, 2018).

Foram produzidos três corpos de prova para cada família de concreto realizada, e esses exemplares foram mantidos em câmara úmida por 70 dias. Após esse período, os corpos de prova foram submetidos a uma estufa com temperatura de  $100 \pm 5$  °C, até atingirem a constância de massa. Após essa etapa, os corpos de prova foram removidos da estufa e resfriados até a temperatura ambiente de  $23 \pm 2$  °C e sua massa seca foi determinada com o auxílio de uma balança, a qual foi usada durante todo o ensaio. Esses corpos de prova foram posicionados com sua base elevada sobre um recipiente, que foi preenchido com água de modo que o nível permanecesse constante a  $5 \pm 1$  mm acima da face inferior.

O ensaio consistiu na medição de massa dos corpos de prova nos intervalos de tempo estabelecidos pela norma, a contar do momento em que a amostra entrou em contato com a água.

### 3.5.2 Variação de massa

Durante a fase de aquecimento dos corpos de prova, a massa inicial do concreto tende a decrescer em função da perda de água por evaporação e das diversas transformações físico-químicas que ele experimenta (Souza, 2014). Sendo assim, o método de perda de massa consiste na pesagem de cada corpo de prova antes e após cada ciclo de temperatura. Essa caracterização permite relacionar as faixas de temperatura com sua massa residual e correlacionar as variações à massa de água evaporada e às reações ocorridas nos concretos.

Adicionalmente, durante o processo de cura e sazonalidade realizado nos copos de prova, foram realizadas medições semanais em temperatura ambiente. A perda de massa foi expressa em porcentagem, calculada como a diferença entre a massa inicial e final dividida pela massa inicial. Essa análise proporcionou a determinação do teor de umidade quando realizados os ensaios. Para todas as medições foi utilizada a mesma balança, com precisão de 0,001 kg.

### **3.5.3 Resistência à compressão ambiente e após aquecimento**

Os procedimentos do ensaio de resistência à compressão simples seguiram as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018). Todos os ensaios foram realizados em uma prensa hidráulica, modelo Shimadzu UH-I, com capacidade de carga de até 2000 kN e monitoramento computacional.

### **3.5.4 Módulo de elasticidade ambiente e após aquecimento**

Este ensaio foi conduzido de acordo com os procedimentos estabelecidos na NBR 8522-1 (ABNT, 2021a), adotando-se o Método da Tensão Fixa. Foram ensaiados três corpos de prova, considerando as deformações específicas correspondentes à tensão mínima de 0,5 MPa e à tensão máxima igual a 30% da tensão de ruptura.

Para a realização do ensaio, foram utilizados 2 transdutores de deslocamento do tipo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT) e uma prensa hidráulica, modelo Shimadzu UH-I. As medições de carga e de deformação específica foram registradas pelo *software Catman Easy*.

### **3.5.5 Homogeneidade do concreto**

A degradação da homogeneidade dos copos de prova devido à ação térmica foi avaliada por meio do método de ensaio não destrutivo de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU), no qual a velocidade de propagação da onda ultrassônica no interior do corpo de prova é determinada, permitindo avaliar a sua compacidade e homogeneidade.

Os corpos de prova foram ensaiados antes e após a exposição dos patamares de temperatura. Para a realização do ensaio foi utilizado o equipamento Pundit Lab, da marca Proceq, com transdutor de frequência igual a 54 kHz, valor recomendado para a maioria das aplicações em concreto, segundo a *Screening Eagle Technologies* (2021). Paralelamente, foi considerada as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2019). Como parâmetro de qualidade do concreto, foi utilizado o guia TCS-17, publicado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2002), conforme apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 – 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).

As demais informações referentes ao equipamento utilizado, aos parâmetros utilizados durante os ensaios e aos dados de entrada, unidades de saída, entre outras informações são apresentados respectivamente na Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 21 – Equipamento de ultrassom para o ensaio de VPU

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
< 2000	Ruim

Fonte: adaptado de IAEA (2002).

Tabela 22 – Parâmetros do sistema do ensaio de VPU

Frequência de transmissão	54 kHz
Calibração	Bloco de calibração 25 $\mu$ s (710 10 028)
Largura de Pulso	9,3 $\mu$ s
Resolução	0,1 $\mu$ s
Estágio de ganho integrado	10x
Pulso energizante	500 V

Fonte: adaptado de IAEA (2002).

Tabela 23 – Outras informações do ensaio de VPU

<b>Dados de entrada</b>	
Comprimento do corpo de prova (m)	0,190
Correção de temperatura	1
<b>Dados de saída</b>	
Tempo	$\mu$ s
Velocidade	m/s
<b>Outras informações</b>	
Acoplamento	Gel clínico para ultrassom
Digitalização	Manual

Fonte: adaptado de IAEA (2002).

### 3.5.6 Avaliação visual de fissuras e *spalling*

Como análise complementar, realizou-se a inspeção visual dos corpos de prova após serem submetidos a elevadas temperaturas, com o intuito de detectar eventuais deslocamentos e *spalling* explosivos. Adicionalmente, foi investigada a influência do RCV na redução da ocorrência de *spalling* explosivo nos corpos de prova submetidos a uma rápida taxa de aquecimento (27 °C/min) e temperatura máxima de aquecimento de 1000°C.

## 3.6 EXPOSIÇÃO A ELEVADAS TEMPERATURAS

Esta etapa consistiu na exposição dos corpos de prova à ação das elevadas temperaturas, desde a temperatura ambiente até à temperatura de 800°C, utilizando um forno elétrico industrial. Esse método de exposição foi conduzido com base na simulação dos aquecimentos realizados anteriormente por Franchetto (2022).

Conforme representado na Figura 15, utilizou-se um forno elétrico da marca Sanchis, com capacidade de atingir até 1300 °C. O forno foi configurado para manter uma taxa de aquecimento constante e lenta de 1 °C/min e o procedimento seguiu as instruções prescritas na RILEM TC 129-MHT (2004).

Figura 15 – Forno elétrico industrial utilizado na pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor.

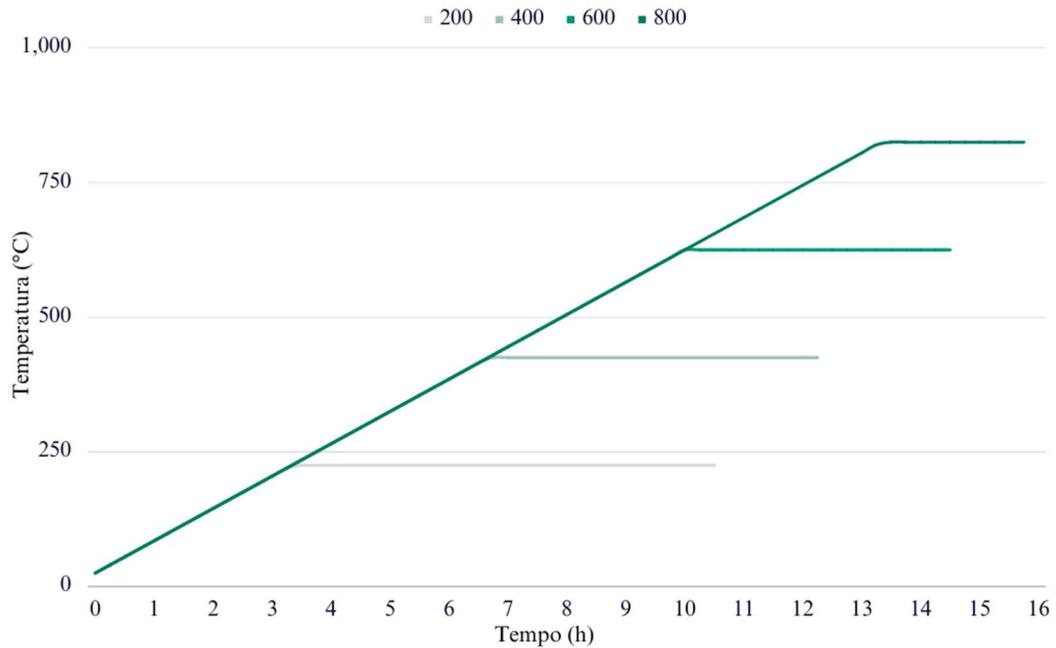
Os tempos adotados para cada etapa em função da temperatura são apresentados na Tabela 24 e as curvas de aquecimento são apresentadas na Figura 16.

Tabela 24 – Tempo de homogeneização das temperaturas

Tempo (horas)	Temperatura (°C)			
	225	425	625	825
Aquecimento	03:25	06:45	10:05	13:25
Homogeneização	07:15	05:30	04:20	02:15
Total	10:40	12:15	14:25	15:40

Fonte: adaptado de Franchetto (2022).

Figura 16 – Curvas de aquecimento para cada patamar



Fonte: elaborado pelo autor.

Após a exposição dos corpos de prova às temperaturas-alvo, seguiu-se com o processo de resfriamento na temperatura ambiente. Em seguida, realizaram-se as medições quanto a sua massa residual e submeteram-se os corpos de prova aos ensaios de comportamento no estado endurecido.

### 3.7 ANÁLISE DE CUSTO

Esta etapa consistiu na mensuração dos custos que a utilização do RCV no CAA pode gerar em comparação ao CC e ao CAA com *filler* de areia.

Para analisar a diferença dos custos entre as famílias de concreto, foi desenvolvida a Equação 01, levando em consideração o consumo de cada material por metro cúbico.

$$C_t = C_c * (\$C + b * \$b + a * \$a + f * \$f + SP\% * \$SP) \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

C<sub>t</sub>: custo de concreto, em reais por metro cúbico;

C: consumo de cimento por metro cúbico, em kg/m<sup>3</sup>;

b: relação agregado graúdo/cimento

- a: relação agregado miúdo seco/cimento;  
 f: relação *filler*/cimento;  
 SP%: dosagem de aditivo por metro cúbico;  
 \$C: custo unitário do kg de cimento;  
 \$b: custo unitário do kg do agregado graúdo;  
 \$a: custo unitário do kg do agregado miúdo;  
 \$f: custo unitário do kg de *filler*;  
 \$SP: custo unitário do kg de aditivo superplastificante.

Os custos associados à produção do RCV podem variar consideravelmente, levando em conta fatores como a localização da coleta do resíduo, a granulometria do material coletado, o método de moagem adotado, dentre outros parâmetros relevantes. Na Tabela 25 são apresentados os valores encontrados na literatura para a produção do *filler* de RCV.

Tabela 25 – Custo do RCV na literatura

<b>Autor</b>	<b>Custo na moeda local</b>	<b>Custo ajustado para R\$/kg</b>
Basit <i>et al.</i> (2018)	2,00 PKR/kg	0,037
Zhao <i>et al.</i> (2020)	0,33 RBM/kg	0,238
He, Zhi-hai <i>et al.</i> (2021)	0,024 USD/kg	0,121
Wu <i>et al.</i> (2021)	0,170 RBM/kg	0,122
Tan <i>et al.</i> (2020)	0,006 USD/kg	0,029
Meena <i>et al.</i> (2023)	0,500 INR/kg	0,031

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios realizados no estudo, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

### 4.1 DOSAGEM

O traço unitário do CC e dos concretos autoadensáveis dosados pelo método de Tutikian (2004) são apresentados na Tabela 26. Os traços calculados foram determinados a partir da pesquisa de Franchetto (2022) e o teor de argamassa foi fixado em 58%, para todos os concretos. A relação água/cimento e o teor de aditivo foram fixados para as famílias de CAA, com a intenção de diminuir as variáveis que pudessem interferir na análise dos resultados. A substituição de areia por RCV moído foi feita pela massa, com a intenção de manter a relação água/aglomerante. Os teores de substituição em massa de areia regular por *filler* de areia e *filler* de RCV foram de 18,63%, 8,06% e 11,94% para os traços rico, médio e pobre, respectivamente.

Tabela 26 – Traços unitários secos em massa

Concreto	Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo	Filler de areia	Filler de RCV
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	1:3,5	1,00	1,31	1,89	0,45	0,40%	0,30	-
	1:5	1,00	2,28	2,52	0,59	0,60%	0,20	-
	1:6,5	1,00	2,95	3,15	0,76	0,80%	0,40	-
CAA-RCV	1:3,5	1,00	1,31	1,89	0,45	0,40%	-	0,30
	1:5	1,00	2,28	2,52	0,59	0,60%	-	0,20
	1:6,5	1,00	2,95	3,15	0,76	0,80%	-	0,40

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Tabela 27, encontram-se os valores reais de consumo dos materiais (kg/m<sup>3</sup>) utilizados na produção dos concretos.

Tabela 27 – Consumo real dos materiais (kg/m<sup>3</sup>) para os concretos produzidos

Concreto	Traço	Cimento	Areia	Brita	a/c	Aditivo	Filler de areia	Filler de RCV
CC	1:3,5	496,03	798,61	937,50	0,45	-	-	-
	1:5	397,41	985,58	1001,47	0,59	-	-	-
	1:6,5	297,62	997,03	937,50	0,76	-	-	-
CAA	1:3,5	496,95	651,00	939,24	0,45	1,99	149,09	-
	1:5	401,77	916,04	1012,46	0,59	2,41	80,35	-
	1:6,5	300,73	887,15	947,30	0,76	2,41	120,29	-
CAA-RCV	1:3,5	496,46	650,36	938,31	0,45	1,99	-	148,94
	1:5	400,75	913,71	1009,89	0,59	2,41	-	80,15
	1:6,5	300,73	887,15	947,30	0,76	2,41	-	120,29

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.1 Resistência à compressão

Os resultados do ensaio de resistência à compressão axial para as idades de 3, 7, 28 e 63 dias, com as cargas de ruptura (kN) e a resistência à compressão média (MPa) para cada traço e idade, bem como os respectivos valores de desvio padrão e coeficiente de variação são apresentados na Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30, para o CC, o CAA e o CAA-RCV, respectivamente.

Tabela 28 – Resistência à compressão do CC

Idade de ruptura (dias)	Traço	Amostra	F <sub>C</sub> (kN)	F <sub>C</sub> (MPa)	(continua)
					F <sub>MÉD</sub> (MPa)
3	1:3,5	CP1	259,26	32,88	30,80
		CP2	227,95	28,72	
	1:5	CP1	209,21	26,48	25,89
		CP2	198,10	25,29	
	1:6,5	CP1	131,34	16,29	16,69
		CP2	135,00	17,09	
7	1:3,5	CP1	269,40	34,28	35,46
		CP2	288,52	36,63	
	1:5	CP1	208,27	26,43	26,77
		CP2	215,88	27,10	
	1:6,5	CP1	148,20	18,65	19,00
		CP2	152,91	19,34	

(conclusão)

Idade de ruptura (dias)	Traço	Amostra	F <sub>C</sub> (kN)	F <sub>C</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)
28	1:3,5	CP1	321,10	40,71	41,21
		CP2	329,14	41,71	
	1:5	CP1	237,28	29,97	29,84
		CP2	234,20	29,70	
	1:6,5	CP1	189,77	23,89	25,27
		CP2	187,89	26,65	
63	1:3,5	CP1	305,23	38,79	41,14
		CP2	342,94	43,49	
	1:5	CP1	277,20	35,13	34,37
		CP2	265,03	33,61	
	1:6,5	CP1	190,15	24,13	24,24
		CP2	191,51	24,35	

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 29 – Resistência à compressão do CAA

(continua)

Idade de ruptura (dias)	Traço	Amostra	F <sub>C</sub> (kN)	F <sub>C</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)
3	1:3,5	CP1	286,72	36,42	35,86
		CP2	281,08	35,29	
	1:5	CP1	222,84	28,07	29,31
		CP2	241,32	30,54	
	1:6,5	CP1	146,27	18,55	18,52
		CP2	144,85	18,48	
7	1:3,5	CP1	336,06	42,96	40,99
		CP2	310,48	39,01	
	1:5	CP1	254,60	32,00	32,10
		CP2	253,33	32,19	
	1:6,5	CP1	150,72	19,04	20,07
		CP2	166,29	21,10	
28	1:3,5	CP1	386,16	49,20	44,05
		CP2	305,32	38,90	
	1:5	CP1	343,52	43,53	40,93
		CP2	301,57	38,32	
	1:6,5	CP1	204,11	25,76	24,46
		CP2	182,55	23,15	

(conclusão)

Idade de ruptura (dias)	Traço	Amostra	F <sub>C</sub> (kN)	F <sub>C</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)
63	1:3,5	CP1	358,84	45,78	47,52
		CP2	388,18	49,26	
	1:5	CP1	311,29	39,32	44,13
		CP2	386,93	48,94	
	1:6,5	CP1	201,06	25,55	26,08
		CP2	208,29	26,61	

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 30 – Resistência à compressão do CAA-RCV

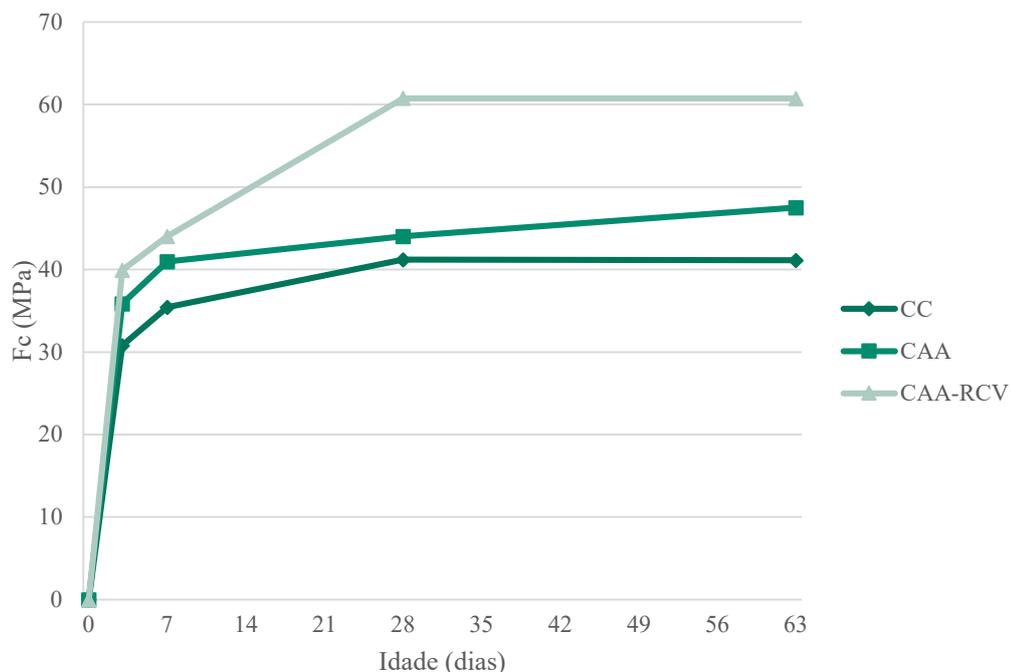
Idade de ruptura (dias)	Traço	Amostra	F <sub>C</sub> (kN)	F <sub>C</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)
3	1:3,5	CP1	305,63	39,07	39,93
		CP2	322,64	40,78	
	1:5	CP1	219,96	27,95	27,81
		CP2	217,68	27,66	
	1:6,5	CP1	142,35	18,04	18,01
		CP2	142,16	17,98	
7	1:3,5	CP1	362,14	46,17	44,02
		CP2	327,31	41,87	
	1:5	CP1	240,59	30,43	31,07
		CP2	249,47	31,70	
	1:6,5	CP1	149,79	19,21	19,22
		CP2	151,57	19,22	
28	1:3,5	CP1	471,71	60,02	60,78
		CP2	484,95	61,54	
	1:5	CP1	320,03	40,50	38,48
		CP2	289,04	36,46	
	1:6,5	CP1	202,69	25,55	26,47
		CP2	216,65	27,38	
63	1:3,5	CP1	489,56	62,25	60,74
		CP2	465,78	59,23	
	1:5	CP1	312,29	39,58	40,83
		CP2	332,48	42,08	
	1:6,5	CP1	220,94	28,00	27,98
		CP2	221,72	27,95	

Fonte: elaborado pelo autor.

O CAA-RCV apresentou resultados satisfatórios de resistência à compressão em todas as idades. Ademais, sua resistência à compressão para o traço rico superou em 27,82% a resistência do CAA aos 63 dias. Esse resultado pode estar atrelado à pozolanicidade que o RCV pode apresentar em idades mais avançadas, principalmente quando comparado ao *filler* de areia utilizado no CAA, uma vez que o teor de substituição no CAA-RCV de traço rico foi o maior dentre todos os traços.

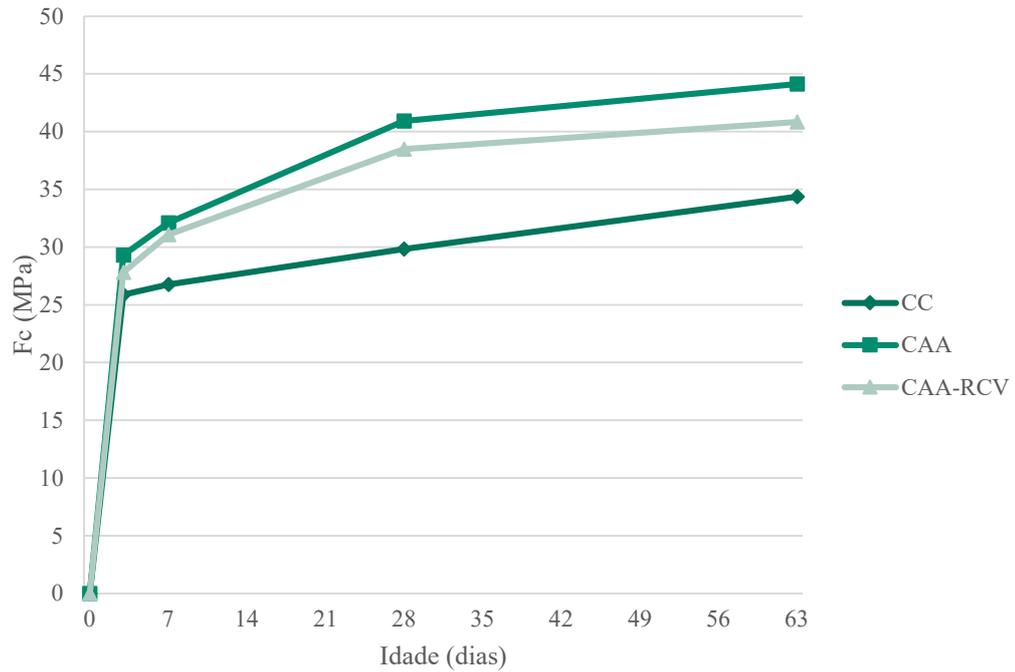
Na Figura 17, Figura 18 e Figura 19 são apresentados os resultados da evolução da resistência à compressão ao longo das idades para os traços rico (1:3,5), intermediário (1:5) e pobre (1:6,5). É possível observar que ambas as famílias de CAA apresentaram resistência à compressão superior aos 63 dias, em comparação com o CC, em todos os traços. O CAA-RCV apresentou resistência à compressão superior ao CAA, nos traços rico e pobre. Entretanto, a resistência à compressão do CAA-RCV foi inferior ao CAA para o traço intermediário em todas as idades. O CAA-RCV de traço intermediário possui o menor teor de substituição dentre todos os traços, fixado em 8,06%, o que pode ter impactado num menor refinamento dos poros e na pozolanicidade do *filler* estudado, resultando em resistências à compressão inferiores às do CAA-RCV de traços rico e pobre.

Figura 17 – Resistência potencial à compressão para o traço 1:3,5 na etapa de dosagem



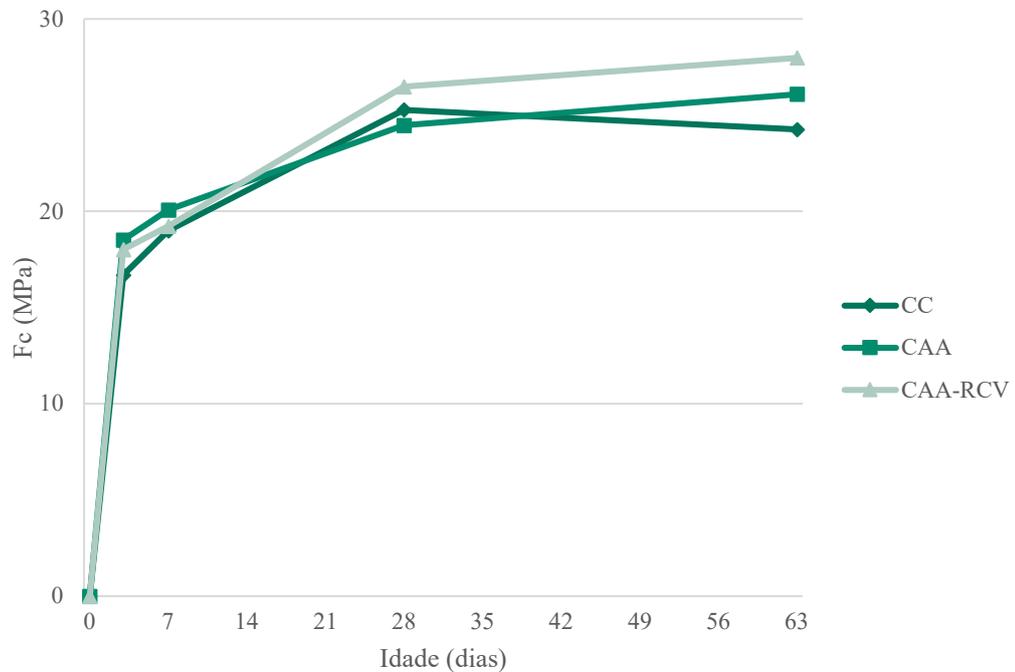
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 – Resistência potencial à compressão para o traço 1:5 na etapa de dosagem



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 – Resistência potencial à compressão para o traço 1:6,5 na etapa de dosagem

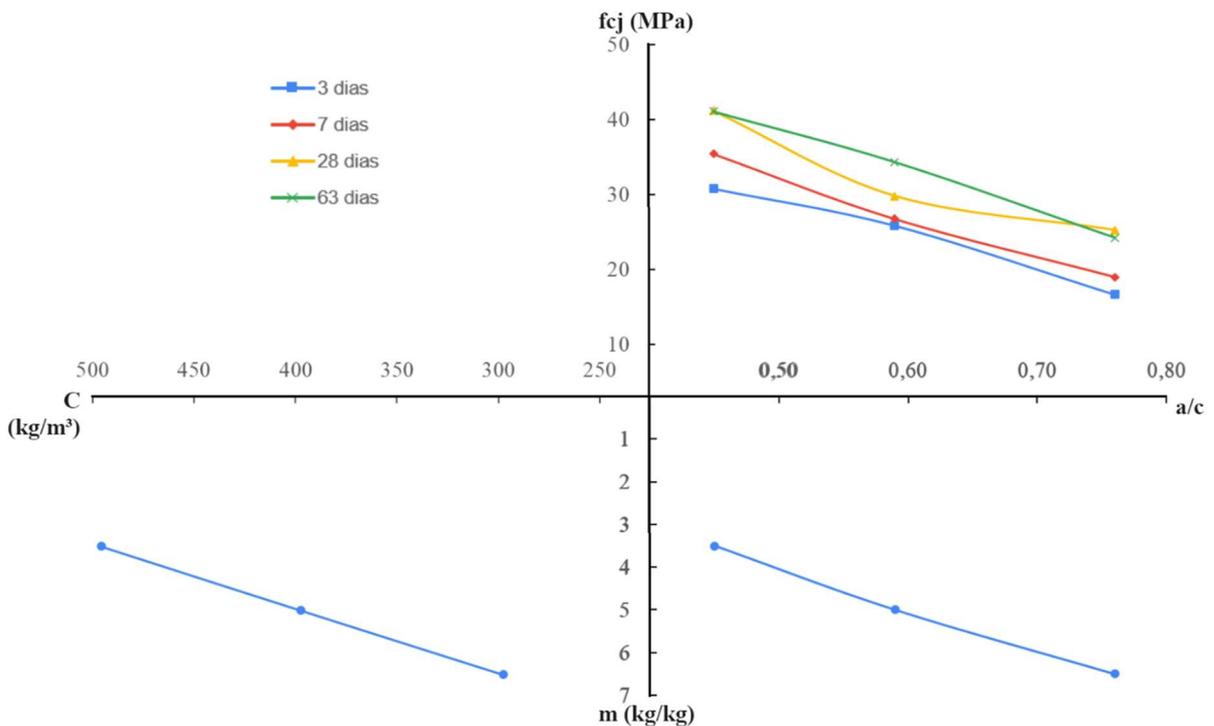


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.2 Curva de dosagem

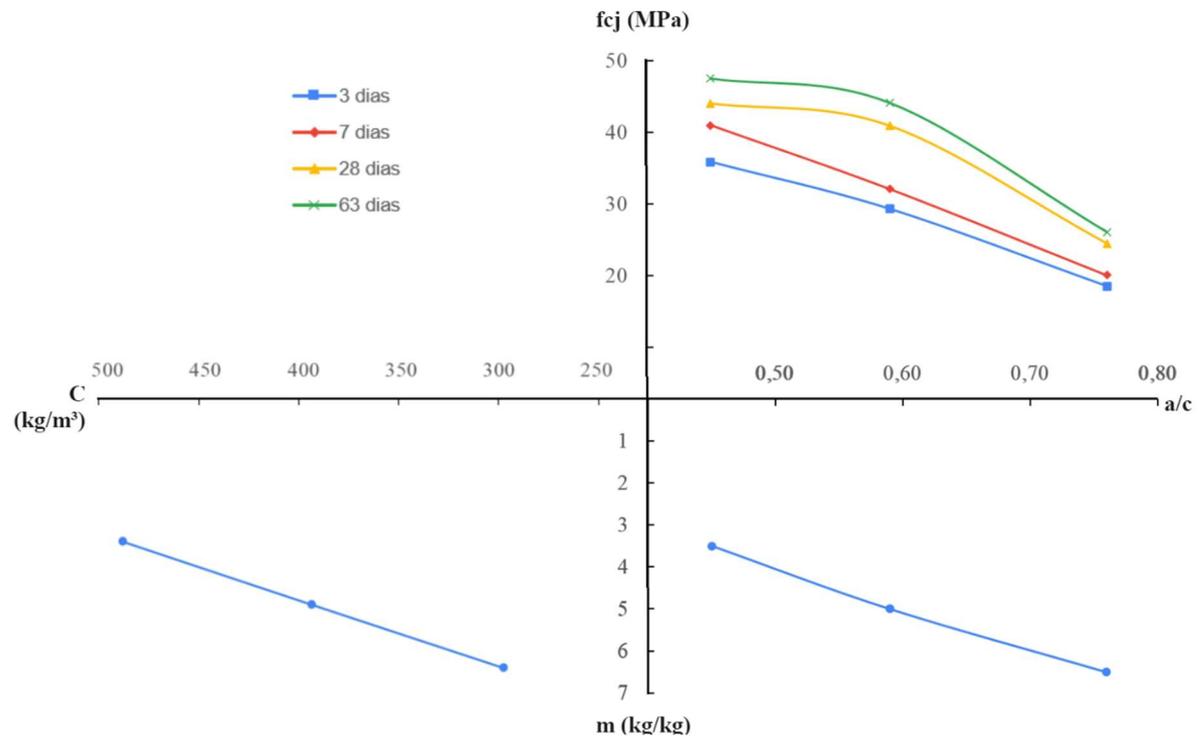
O método de dosagem foi embasado nas leis básicas de comportamento (Abrams, Lyse e Molinari) e o diagrama de dosagem foi desenvolvido com o objetivo de fornecer dados para aproximação de valores de resistência à compressão, consumo de cimento e traço em massa, a partir da relação água/cimento. A partir da Lei de Abrams é possível relacionar a resistência à compressão (MPa) em função da relação a/c, com a Lei de Lyse é possível relacionar o teor de agregados secos (m) em função da relação a/c e, com a Lei de Molinari, é possível relacionar o consumo de cimento em relação ao teor de agregados secos (m). Na Figura 20, Figura 21 e Figura 22 são apresentados os diagramas com as curvas de dosagem para os resultados dos ensaios à compressão aos 3, 7, 28 e 63 dias para os concretos CC, CAA e CAA-RCV, respectivamente.

Figura 20 – Diagrama de dosagem do CC



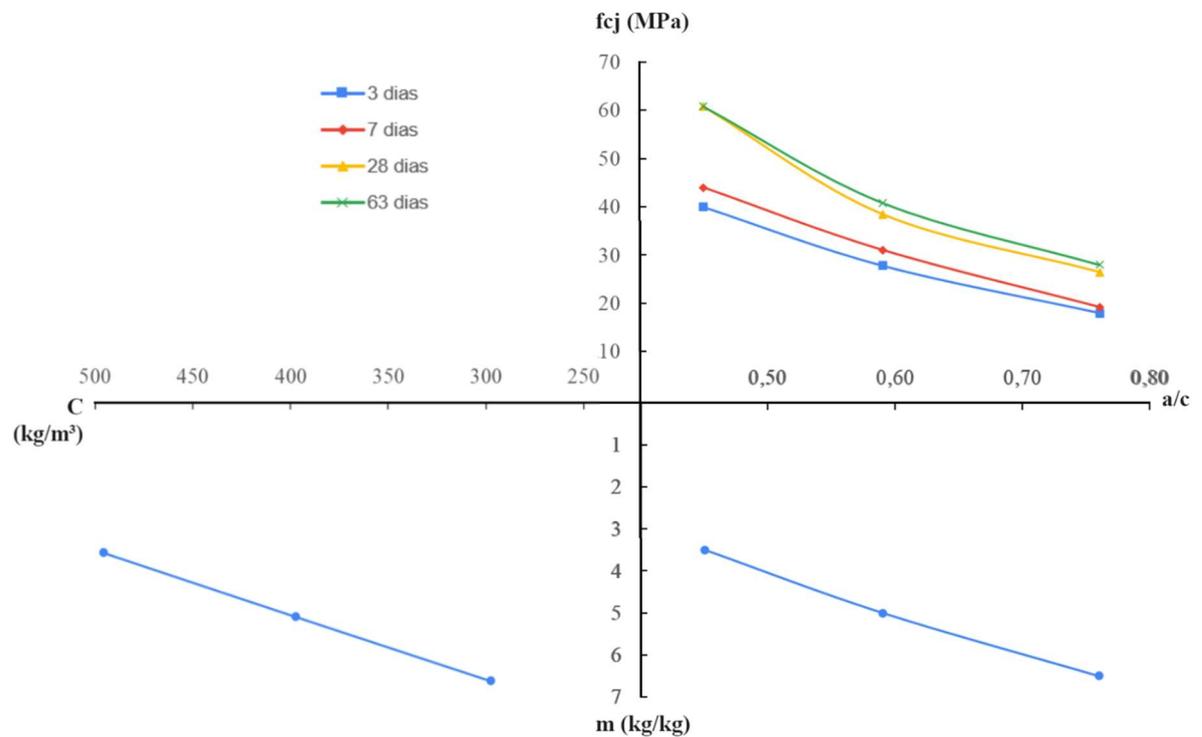
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 21 – Diagrama de dosagem do CAA



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 22 – Diagrama de dosagem do CAA-RCV



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos diagramas é possível determinar o traço ideal, conforme os critérios técnicos e econômicos desejados. Entretanto, o diagrama de dosagem é indicado apenas para aproximação de valores, sendo recomendada a utilização das equações de comportamento para resultados mais precisos. Na Tabela 31 são apresentadas as respectivas equações de comportamento e seus coeficientes, para cada família de concretos. As equações foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados e as planilhas de regressão das curvas de dosagem são apresentadas no APÊNDICE B.

Tabela 31 – Equações de comportamento

Método	CC	CAA	CAA-RCV	
Lei de Abrams	3 dias	$f_{c3} = \frac{78,5718}{7,3729^{a/c}}$	$f_{c3} = \frac{97,8219}{8,6022^{a/c}}$	$f_{c3} = \frac{126,7118}{13,0390^{a/c}}$
		$r^2=0,9647$	$r^2=0,9729$	$r^2=1,0000$
	7 dias	$f_{c7} = \frac{87,7515}{7,4882^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{119,7384}{10,1689^{a/c}}$	$f_{c7} = \frac{148,3268}{14,5642^{a/c}}$
		$r^2=1,0000$	$r^2=0,9847$	$r^2=0,9987$
	28 dias	$f_{c28} = \frac{79,9862}{4,7419^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{113,0208}{6,9464^{a/c}}$	$f_{c28} = \frac{195,6838}{14,3607^{a/c}}$
		$r^2=0,9440$	$r^2=0,8806$	$r^2=0,9872$
	63 dias	$f_{c63} = \frac{91,0952}{5,5769^{a/c}}$	$f_{c63} = \frac{124,2454}{7,2159^{a/c}}$	$f_{c63} = \frac{183,1283}{12,0683^{a/c}}$
		$r^2=0,9840$	$r^2=0,8796$	$r^2=0,9951$
	Lei de Lyse		$m = -0,7884 + 9,6473 * a/c$	
			$r^2=0,9969$	
	Lei de Molinari	$C = \frac{1000}{0,3908 + 0,4480 * m}$	$C = \frac{1000}{0,4206 + 0,4377 * m}$	$C = \frac{1000}{0,4266 + 0,4370 * m}$
		$r^2=0,9787$	$r^2=0,9756$	$r^2=0,9770$

$f_c$  = resistência à compressão (MPa) em função da relação a/c (kg/kg);

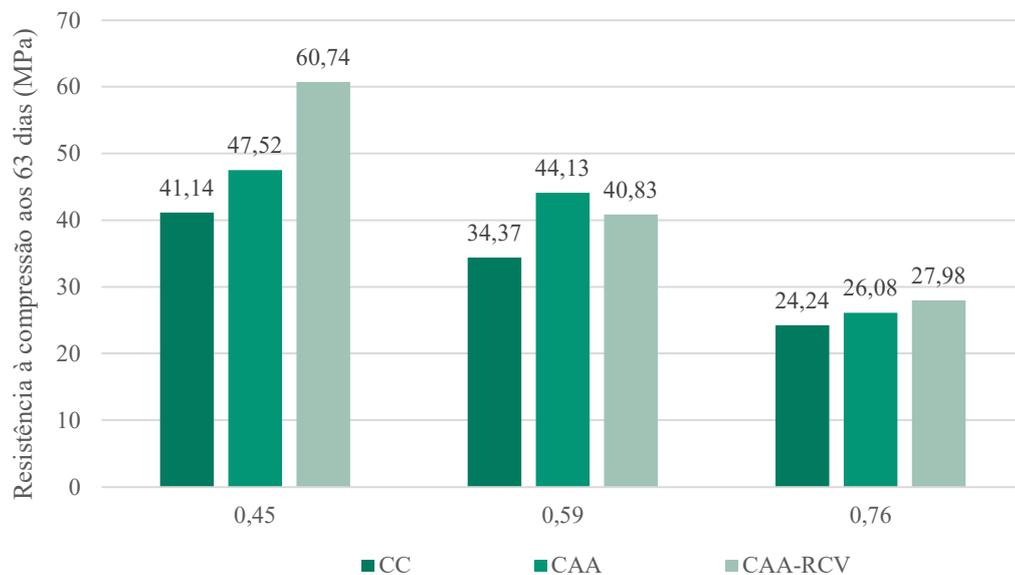
$m$  = teor de agregados secos em função da relação a/c (kg/kg);

$C$  = consumo de cimento em relação ao teor de agregados secos (m).

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir das equações de dosagem, é possível perceber que os valores para  $r^2$  são próximos de 1,00, indicando alta confiabilidade nos resultados. Além disso, pelos diagramas, podemos observar um aumento de resistência à compressão ao longo das quatro idades de ruptura. É notável também que o CAA e o CAA-RCV apresentam resistência à compressão superior em relação ao CC, considerando a mesma relação a/c. Na Figura 23 é apresentada a comparação da resistência aos 63 dias para as diferentes famílias de concreto, considerando o mesmo traço e a mesma relação a/c.

Figura 23 – Comparativo de resistência à compressão aos 63 dias



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme a Figura 23, é possível perceber um acréscimo de resistência para o CAA-RCV de 47,64% e 15,43% em relação ao CC e, um acréscimo de 27,82% e 7,29% em relação ao CAA, para os traços rico e pobre, respectivamente. Entretanto, para o traço intermediário, a maior resistência obtida aos 63 dias foi para o CAA, alcançando um incremento de 28,40% e 8,08%, para o CC e o CAA-RCV, respectivamente.

De forma geral, a maior resistência à compressão observada no CAA-RCV pode estar relacionada à reação pozolânica, conforme resultados encontrados no ensaio de IAP no item 3.2.6.1. Ressalta-se, também, que o efeito da densidade de empacotamento dos grãos na mistura deve ser considerado, visto que o diâmetro máximo do RCV utilizado é ligeiramente menor que o da areia utilizada como *filler* no CAA.

## 4.2 ESTADO FRESCO

Os ensaios no estado fresco seguiram os procedimentos conforme descrito no item 3.4. Para o CC foi realizado no estado fresco o ensaio de abatimento de cone e para o CAA e o CAA-RCV foram realizados os ensaios de espalhamento, tempo de escoamento e índice de estabilidade visual (IEV). Os resultados que avaliam os parâmetros no estado fresco e de autoadensabilidade para os CAA são apresentados na Tabela 32. Para essa pesquisa, não foram considerados outros ensaios para a determinação das propriedades passantes do CAA, uma vez que os corpos de

prova estudados não tiveram sua geometria determinada conforme estrutura real tampouco foi investigada a utilização de elementos com armadura.

Tabela 32 – Classificação dos concretos no estado fresco

Concreto	Traço	a/c	Aditivo (%)	Abatimento (mm)	Espalhamento		Slump Flow T50		Índice de Estabilidade Visual
					(mm)	Classe	(s)	Classe	
CC	1:3,5	0,45	-	80	-	-	-	-	-
	1:5	0,59	-	90	-	-	-	-	-
	1:6,5	0,76	-	80	-	-	-	-	-
CAA	1:3,5	0,45	0,40	-	660	SF2	0,7	VS 1	IEV 0
	1:5	0,59	0,60	-	755	SF3	0,5	VS 1	IEV 0
	1:6,5	0,76	0,80	-	795	SF3	0,4	VS 1	IEV 1
CAA-RCV	1:3,5	0,45	0,40	-	720	SF2	0,7	VS 1	IEV 0
	1:5	0,59	0,60	-	780	SF3	0,5	VS 1	IEV 0
	1:6,5	0,76	0,80	-	656	SF2	0,9	VS 1	IEV 2

Fonte: elaborado pelo autor.

Como foram utilizados os mesmos traços e a mesma relação de água/cimento para todas as famílias e, para os concretos autoadensáveis, a mesma porcentagem de aditivo, esperava-se que os resultados dos ensaios no estado fresco pudessem ser diferentes entre si, visto que as propriedades de porosidade e granulometria do *filler* de areia e de RCV são distintas. A partir desta hipótese, foi considerada como satisfatória a concretagem que apresentasse pelo menos o espalhamento intermediário, isto é, a partir dos parâmetros de classe “SF2”, conforme critérios da ABNT 15823-1 (2017a). Os resultados dos ensaios demonstram que todos os concretos produzidos no estudo são aceitáveis para os parâmetros estabelecidos pela norma. Ademais, a partir desses resultados, é possível observar que a substituição da areia por RCV como adição de *filler* no CAA confere boas características de autoadensabilidade.

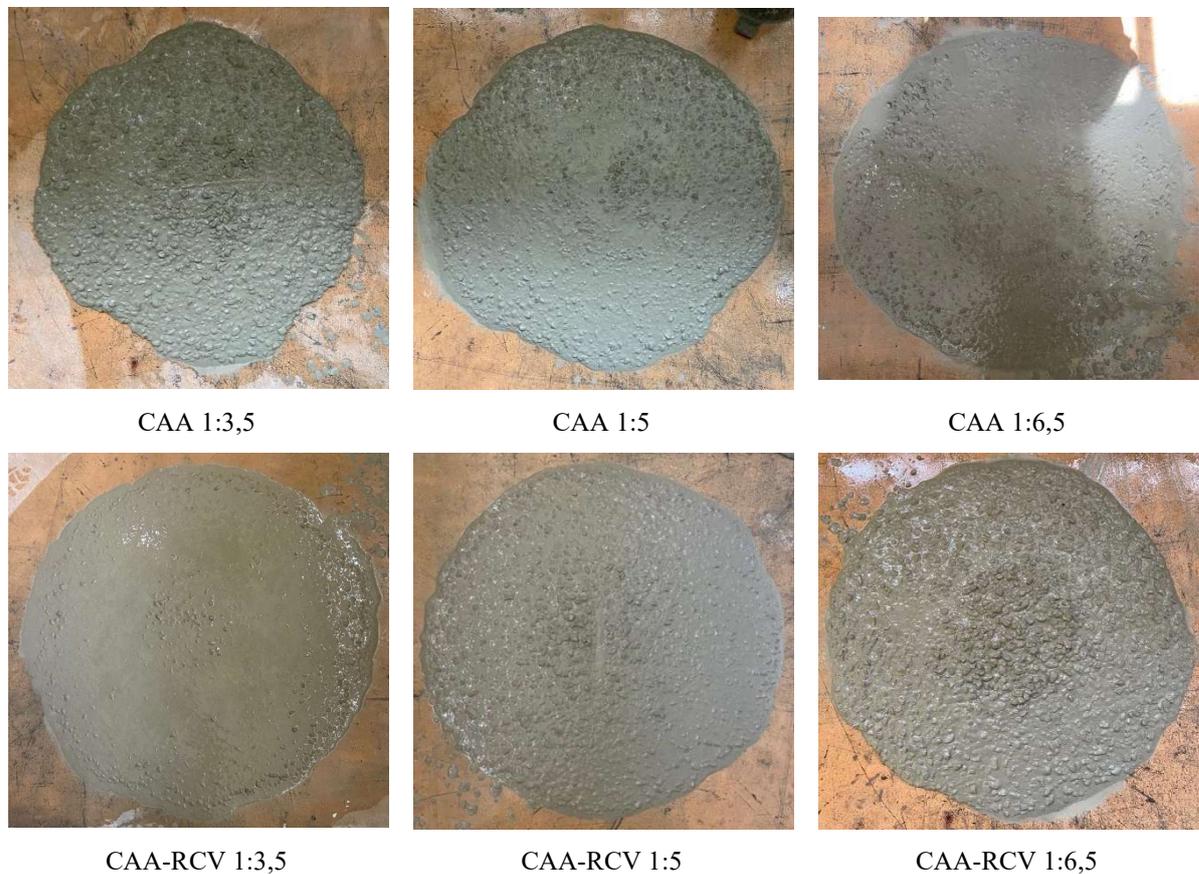
Entretanto, apesar de o espalhamento do CAA-RCV apresentar um ligeiro acréscimo em relação ao CAA, não é possível afirmar com convicção de que o material pode influenciar no aumento de espalhamento, devido às concretagens terem sido realizadas em dias distintos e os fatores externos de umidade e temperatura poderem ter afetado na exsudação do concreto.

A viscosidade do concreto é apresentada pelo tempo de escoamento, através do ensaio SlumpFlow T50 e ambos os concretos autoadensáveis apresentaram tempo inferior a 2 segundos, portanto se classificando como “VS1”.

Ambos os concretos confeccionados no presente estudo apresentaram aspecto coeso. Todavia, o CAA-RCV apresentou de forma mais evidente esse aspecto, e isso pode estar relacionado ao menor diâmetro máximo do *filler* de RCV utilizado em comparação ao *filler* de areia.

O índice de estabilidade visual permite avaliar os concretos autoadensáveis de forma qualitativa, quanto à segregação e exsudação. O CAA de traço 1:6,5 apresentou uma leve exsudação no perímetro do seu espalhamento. Por outro lado, o CAA-RCV de traço 1:6,5 apresentou uma leve formação de auréola no seu centro. Na Figura 24 são apresentados os registros de cada concreto após realizado os ensaios no estado fresco.

Figura 24 – Registros fotográficos dos concretos autoadensáveis no estado fresco



Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.3 ESTADO ENDURECIDO

No estado endurecido, os concretos foram submetidos à avaliação de suas propriedades mecânicas residuais após a exposição a elevadas temperaturas, incluindo os ensaios de compressão axial e módulo de elasticidade. Adicionalmente, foram investigadas outras

propriedades no estado endurecido, como a durabilidade, por meio do ensaio de absorção por capilaridade, variação de massa, teor de umidade, e homogeneidade do concreto. Nos ensaios no estado endurecido, prosseguiu-se apenas com o traço intermediário, conforme elucidado no item 3.1.

Após a concretagem e a moldagem dos corpos de prova, os corpos de prova foram curados em câmara úmida por sete dias. Ao finalizar esse período, os corpos de prova foram acondicionados em um ambiente com temperatura e umidade controladas, conforme descrito no item 3.3.7. A seguir são descritos os resultados encontrados em cada ensaio realizado.

#### 4.3.1 Absorção por capilaridade

A absorção de água no concreto está intrinsecamente relacionada à quantidade de poros permeáveis em sua estrutura. Portanto, compreender essa estrutura de poros permite prever a durabilidade do concreto, relacioná-la ao comportamento sob elevadas temperaturas e à possível ocorrência de *spalling*. Sendo assim, a absorção de água por capilaridade foi avaliada após os corpos de prova terem sido submetidos a diferentes períodos de contato com a água, variando de 3 a 72 horas, conforme descrito no item 3.5.1. Os resultados apresentados na Tabela 33 são as médias obtidas a partir de três corpos de prova ensaiados aos 70 dias de idade. Algumas pesquisas anteriores sugeriram que os poros capilares podem diminuir à medida que o concreto envelhece. Segundo Silva, Lange e Delvasto (2019), a absorção de água das misturas com *filler* de RCV aumentou até 28 dias em relação à amostra de referência. Porém, em idades mais avançadas, com o progresso da cura, a absorção de água diminuiu em decorrência do processo de hidratação. Silva *et al.* (2021) indicaram que o *filler* de RCV pode reduzir a absorção de água do CAA em idades posteriores devido ao aumento do teor de C-S-H como resultado de sua atividade pozzolânica, bem como da progressão da hidratação do cimento Portland comum. Portanto, o ensaio foi conduzido com os corpos de prova em idade mais avançada, a fim de produzir resultados condizentes com a idade na qual foi avaliado o comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas.

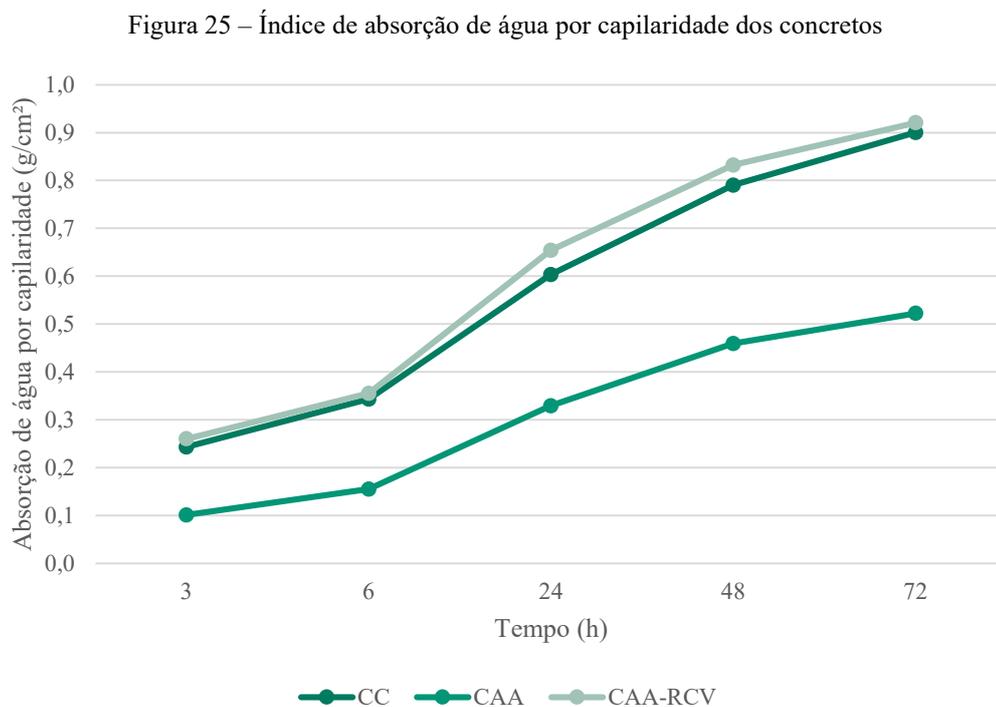
Tabela 33 – Absorção de água por capilaridade dos concretos

Concreto	Absorção capilar ± desvio padrão (g/cm <sup>2</sup> )				
	3h	6h	24h	48h	72h
CC_1:5	0,244 ± 0,059	0,343 ± 0,075	0,604 ± 0,121	0,790 ± 0,161	0,900 ± 0,193
CAA_1:5	0,101 ± 0,001	0,156 ± 0,003	0,329 ± 0,016	0,459 ± 0,010	0,523 ± 0,001
CAA-RCV_1:5	0,260 ± 0,016	0,356 ± 0,016	0,654 ± 0,019	0,832 ± 0,022	0,921 ± 0,025

Fonte: elaborado pelo autor.

Na Figura 25 é apresentada a evolução das absorções de água por capilaridade dos concretos ao longo do tempo. É possível constatar que o CAA-RCV apresenta uma taxa de sorptividade superior à dos demais concretos. Após 72 horas, essa taxa aumentou aproximadamente 2,29% e 76% em relação ao CC e ao CAA, respectivamente. Segundo Santos (2018), esse comportamento está associado à estrutura interna dos materiais cerâmicos, uma vez que o seu processo produtivo confere uma maior porosidade e, conseqüentemente, favorecem a formação de poros capilares, contribuindo para maior absorção de água.

O CAA foi o que absorveu menos água, possivelmente devido à sua estrutura de poros mais refinada, especialmente quando comparada com a do CC. Zhu e Bartos (2003) relataram que, comparado ao CC que é vibrado no local, o CAA apresenta valores significativamente mais baixos para a absorção de água.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.3.2 Variação de massa

Durante o período desde a concretagem até irem ao forno, todos os corpos de prova foram pesados semanalmente, com a intenção de controlar a variação de massa e teor de umidade. Os dados referentes a massa, dimensões e densidade dos corpos de prova no estado endurecido são apresentados no APÊNDICE C, APÊNDICE D e APÊNDICE E, respectivamente. A média de densidade dos corpos de prova pode ser verificada na Tabela 34.

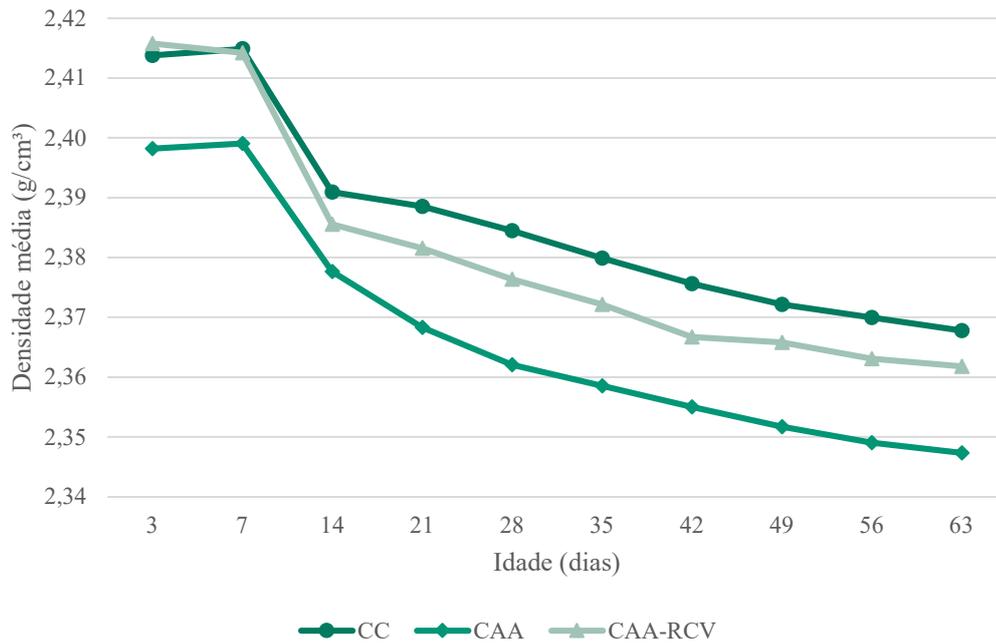
Tabela 34 – Densidade média em função do tempo

Idade (dias)	CC		CAA		CAA-RCV	
	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão	Média (g/cm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão
3	2,4138	0,0184	2,3982	0,0218	2,4158	0,0196
7	2,4149	0,0186	2,3991	0,0219	2,4142	0,0196
14	2,3909	0,0183	2,3777	0,0217	2,3855	0,0201
21	2,3759	0,0257	2,3683	0,0217	2,3815	0,0202
28	2,3845	0,0184	2,3621	0,0216	2,3764	0,0203
35	2,3799	0,0184	-	-	2,3722	0,0204
42	2,3756	0,0184	2,3550	0,0217	2,3667	0,0275
49	2,3722	0,0184	2,3517	0,0217	2,3658	0,0205
56	-	-	2,3491	0,0216	2,3631	0,0205
63	2,3678	0,0184	2,3474	0,0217	2,3618	0,0206

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível verificar que todos os concretos perderam umidade após saírem da câmara úmida e que o período entre as idades de 7 dias e 14 dias foi o qual ocorreu a maior perda de umidade. O CC aos 63 dias teve uma perda de densidade média em relação à idade de 3 dias de 1,91%, enquanto o CAA e o CAA-RCV tiveram uma perda de 2,12 e 2,23%, respectivamente. A perda de densidade ao longo dos dias pode estar relacionada à porosidade dos materiais, uma porosidade superior permite que a saída da água dentro do concreto ocorra em maior evidência, e o fato de o CAA-RCV ser o concreto que mais perdeu umidade ao longo dos dias pode estar relacionado à porosidade inerente do RCV, principalmente quando comparado com a areia utilizada como *filler* no CAA. Na Figura 26, é apresentada a relação da densidade média em função do tempo.

Figura 26 – Densidade média em função da idade



Fonte: elaborado pelo autor.

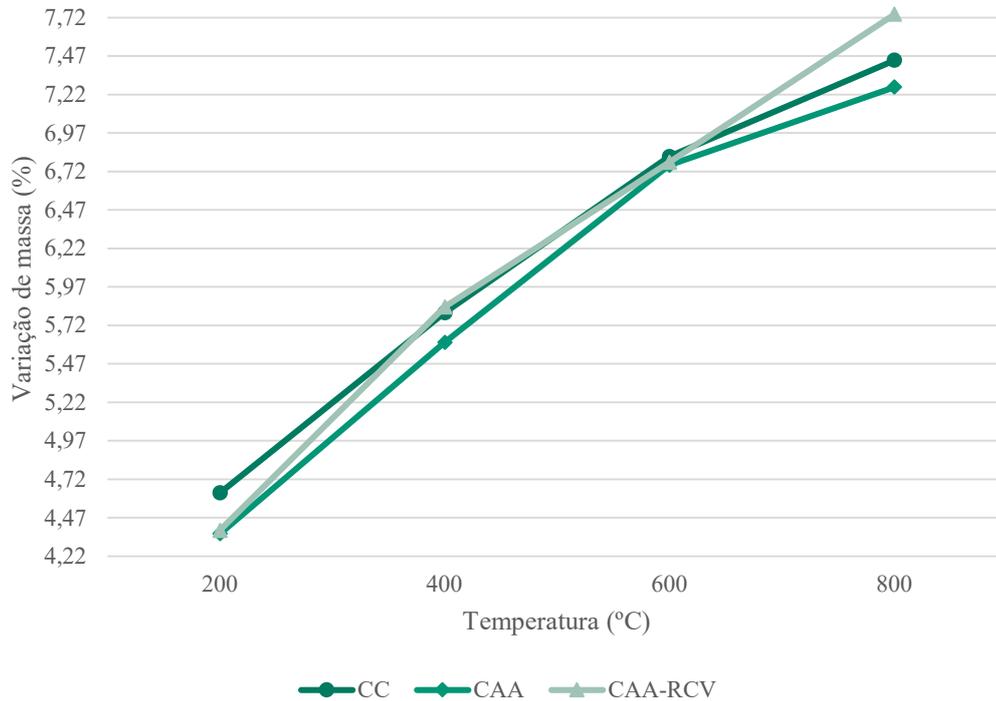
Adicionalmente, os corpos de prova foram pesados imediatamente antes e após serem submetidos aos patamares de temperatura, de forma que fosse possível determinar a quantidade de umidade perdida. Os dados referentes à variação de massa antes e após os patamares de temperatura são apresentados no APÊNDICE F. As relações de variação de umidade média em função do patamar de temperatura são apresentadas na Tabela 35 e as respectivas curvas na Figura 27.

Tabela 35 – Variação de massa em função do patamar de temperatura

Temperatura (°C)	Variação de Massa (%)		
	CC	CAA	CAA-RCV
Ambiente	-	-	-
200	4,63	4,37	4,39
400	5,80	5,61	5,84
600	6,82	6,76	6,78
800	7,44	7,27	7,74

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27 – Variação de massa em função do patamar de temperatura



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados mostrados na Figura 27, é possível observar que o CAA-RCV foi o concreto que mais sofreu variação de umidade após ser submetido a temperatura de 800°C. Em contrapartida, a diferença de variação de umidade para a temperatura de 200°C entre o CAA e o CAA-RCV foi quase nula. Para os demais patamares o CC foi a família que mais sofreu perda de umidade pela exposição à temperatura e isso pode estar associado à ausência de uma maior porção de *filler* em sua matriz e sua capacidade de compactação dos poros ser inferior quando comparado às outras duas famílias de concreto autoadensável, levando a uma evaporação mais elevada da água nos poros. De acordo com Reinhardt e Stegmaier (2006), a perda de massa é um fenômeno comum que ocorre quando o concreto é exposto a temperaturas elevadas, podendo ser atribuída à evaporação da água nos poros, seguida pela decomposição do meio ligante.

### 4.3.3 Homogeneidade do concreto

Para a análise da homogeneidade do concreto, cada corpo de prova foi submetido a análise de VPU por transmissão direta antes e após terem sido submetidos aos patamares de aquecimento. Foram analisados 30 corpos de prova para cada família de concreto, considerando todos os

cinco patamares de temperatura, conforme apresentado no APÊNDICE G. O ensaio foi realizado em temperatura controlada de  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ , e os dados foram considerados satisfatórios quando foi obtido o valor de leitura com variação máxima de 1%. Após, realizou-se a análise dos resultados e desprezou-se os valores que estivessem acima ou abaixo do desvio padrão. As médias das velocidades de pulso ultrassônico em função da família de concreto para cada patamar de temperatura podem ser visualizadas na Tabela 36. A variação da degradação do concreto, conforme o resultado da velocidade, pode ser visualizada na Tabela 37, os parâmetros utilizados como referência estão conforme o IAEA (2002). Todas as famílias de concreto apresentaram desempenho excelentes, com velocidade acima de 4.500 m/s para os corpos de prova na temperatura ambiente. Em contrapartida, os resultados foram considerados ruins para o patamar de  $800^{\circ}\text{C}$ , sendo que para o CC os resultados não são satisfatórios a partir do patamar de  $600^{\circ}\text{C}$ , faixa na qual os efeitos deletérios da temperatura ocasionam a desidratação seguida pela evaporação da água livre e quimicamente ligada e o C-S-H da pasta de cimento se decompõem.

Tabela 36 – Média das velocidades (m/s) para cada patamar de temperatura em função da família de concreto

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Média da velocidade (m/s)		
	CC	CAA	CAA-RCV
Ambiente	4578	4527	4670
200	3957	3934	4018
400	3197	3110	3310
600	1518	2005	2080
800	1246	1465	1592

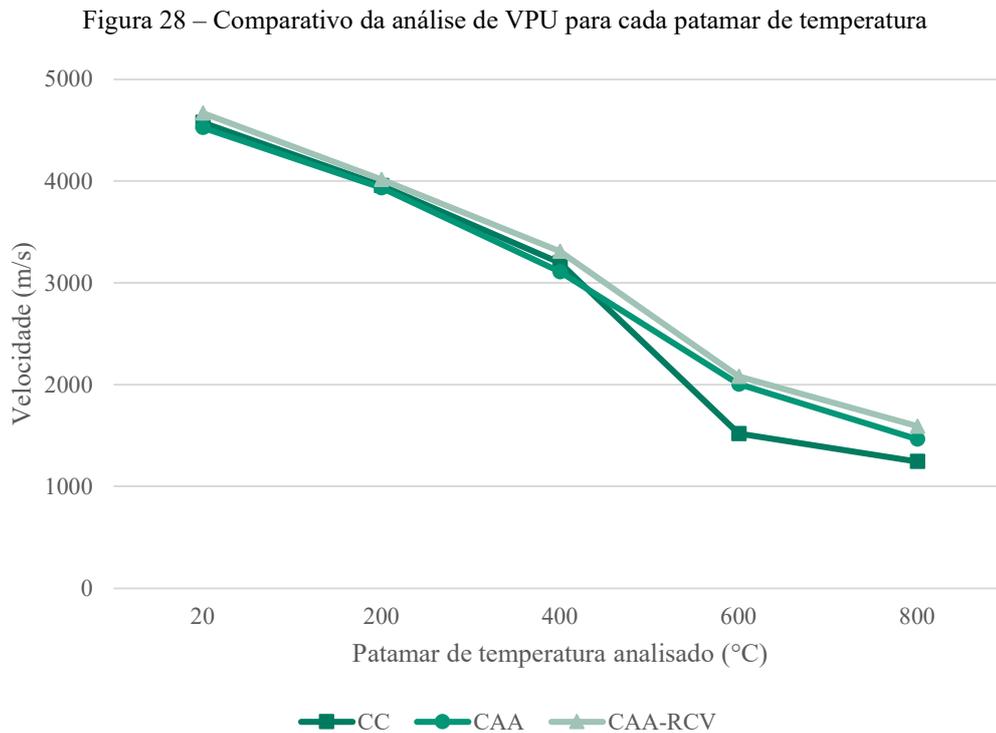
Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 37 – Qualidade do concreto em função da VPU para cada patamar de temperatura

Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Qualidade do concreto		
	CC	CAA	CAA-RCV
Ambiente	Excelente	Excelente	Excelente
200	Ótimo	Ótimo	Ótimo
400	Bom	Bom	Bom
600	Ruim	Regular	Regular
800	Ruim	Ruim	Ruim

Fonte: elaborado pelo autor.

As variações de velocidade observadas para cada família de concreto podem ser visualizadas na Figura 28, evidenciando que a maior redução na VPU ocorre na faixa de temperatura entre 400 e 600°C, intervalo de temperatura na qual o concreto costuma apresentar uma deterioração significativa. Em relação aos tipos de concreto, é possível observar que os resultados obtidos para o CAA-RCV foram ligeiramente melhores para todos os patamares.

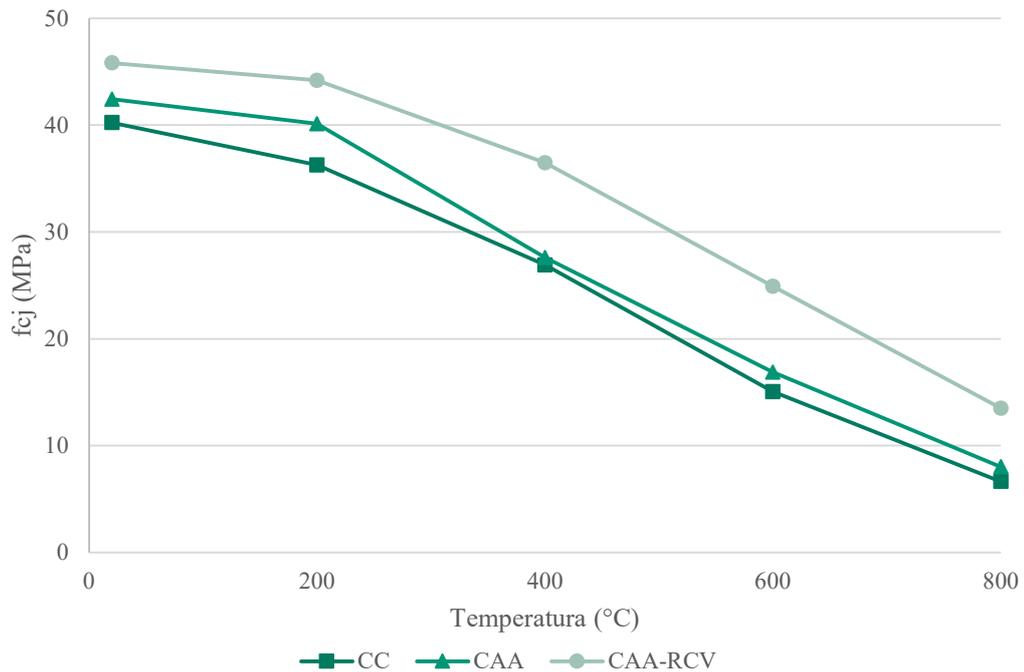


Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.3.4 Resistência à compressão ambiente e após aquecimento

Após os corpos de prova terem sido submetidos aos patamares de aquecimento no forno e aos ensaios não destrutivos, foram realizados os ensaios de resistência à compressão. Para cada patamar de temperatura foram analisados 6 corpos de prova, sendo que três foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão e os outros três submetidos ao ensaio de módulo de elasticidade e posterior rompimento à compressão. No APÊNDICE H são apresentados os resultados obtidos de resistência à compressão dos três corpos de prova e a resistência à compressão dos corpos de prova submetidos previamente ao ensaio de módulo. As médias apresentadas na Figura 29 foram obtidas a partir do grupo de três corpos de prova submetidos exclusivamente ao ensaio de compressão para cada patamar de temperatura.

Figura 29 – Resistência média à compressão para cada patamar de temperatura



Fonte: elaborado pelo autor.

Equiparado aos resultados analisados previamente no ensaio de VPU, a maior perda de resistência se deu entre as faixas de 400° e 600°C. O CAA-RCV apresentou uma maior resistência à compressão para todas as temperaturas e o CAA a partir dos 400°C apresentou uma resistência à compressão mais próxima da resistência do CC de referência. A fim de obter uma melhor interpretação dos dados, foi realizada a normalização, apresentada na Tabela 38.

Tabela 38 – Fator de redução da resistência à compressão em função da temperatura

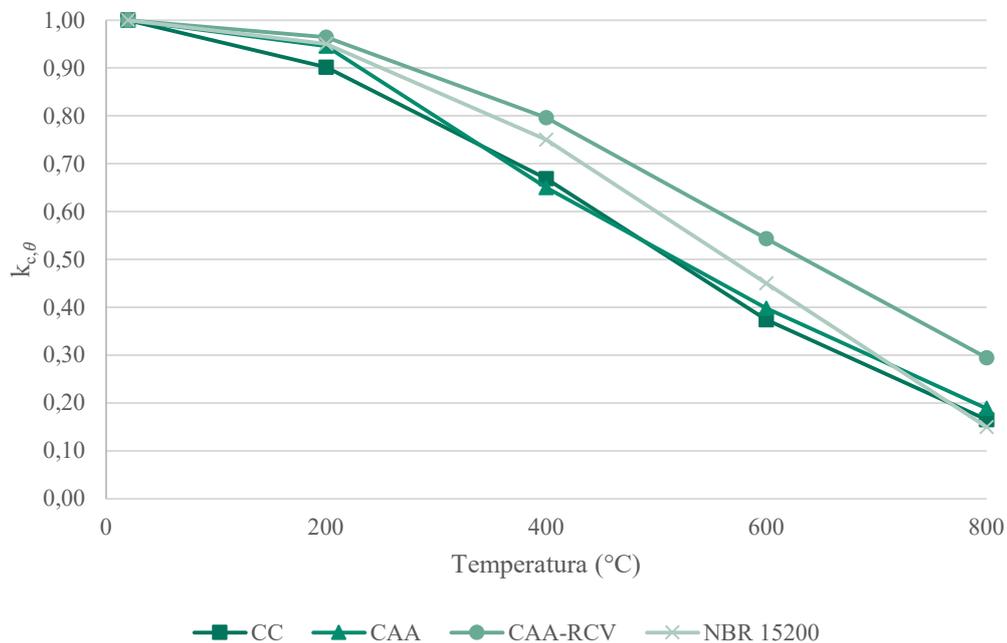
Temperatura (°C)	CC	CAA	CAA-RCV	NBR 15200
20	1,00	1,00	1,00	1,00
200	0,90	0,95	0,96	0,95
400	0,67	0,65	0,80	0,75
600	0,37	0,40	0,54	0,45
800	0,17	0,19	0,29	0,15

Fonte: elaborado pelo autor.

Ao normalizar os dados fica mais evidente que a família mais afetada pelas elevadas taxas de temperatura foi o CC, perdendo 83% da sua resistência à compressão quando submetido à 800 °C em comparação à resistência à compressão na temperatura ambiente, enquanto o CAA

perdeu 81% e o CAA-RCV perdeu 71%. Para o CC e para o CAA-RCV, a faixa de temperatura de 600°C foi a que mais afetou os concretos, com uma diferença de resistência em relação à faixa de temperatura anterior de 29 e 25%, respectivamente. Por outro lado, para o CAA, a faixa de temperatura de 400°C foi a que ocasionou maior degradação, perdendo 29% de sua resistência em relação ao patamar de temperatura anterior. Além disso, na última coluna são apresentados os valores fornecidos pela NBR 15200 (2012b) da relação entre a resistência à compressão do concreto submetido a diferentes temperaturas e a resistência característica à compressão à temperatura ambiente. A partir dos valores estimados pela NBR 15200 (2012b), é possível perceber que o CAA-RCV é a única família de concreto que apresentou um fator superior ao fornecido como referência para todos os patamares de temperatura. Contudo, no patamar de 800°C todos os concretos voltam a apresentar fator de resistência superior ao fornecido como referência pela norma NBR 15200 (2012b). Na Figura 30 é possível comparar as curvas de resistências médias à compressão normalizadas, as quais são denominadas fator de redução da resistência em função da temperatura ( $k_{c,\theta}$ ).

Figura 30 – Fatores de redução de resistência em função da temperatura

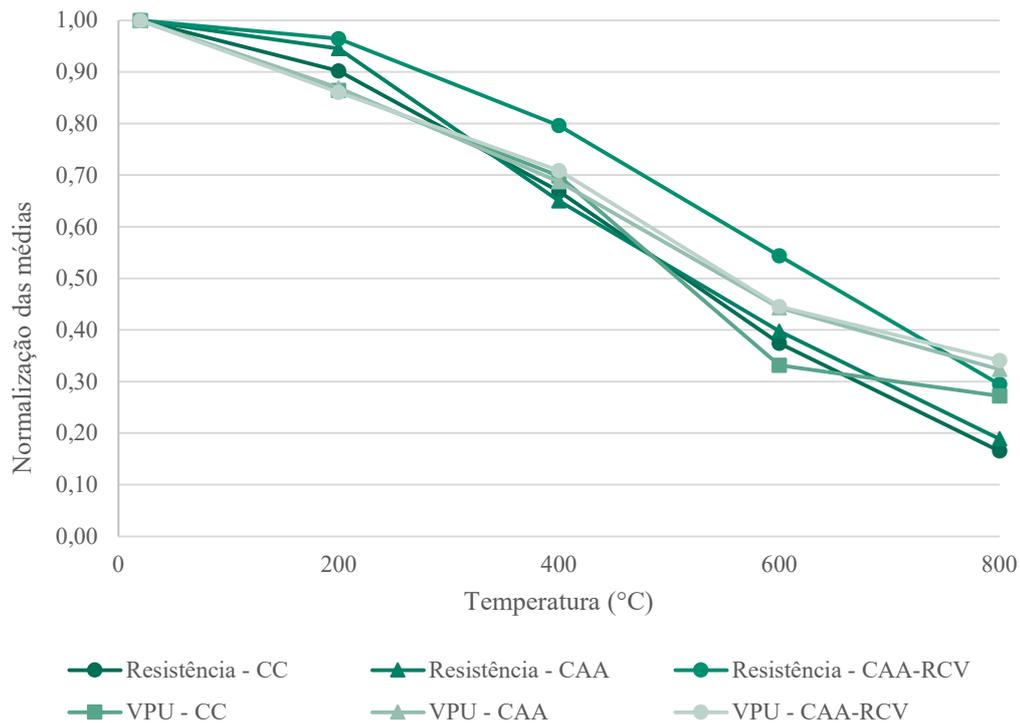


Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da Figura 31, é possível correlacionar a resistência à compressão normalizada com o resultado normalizado obtido no ensaio de VPU, em função dos patamares de temperatura. A partir do gráfico é possível observar que as curvas apresentam inclinações semelhantes até

atingirem 600°C. Além disso, é possível observar que, apesar de o CAA-RCV possuir uma fração de material mais porosa em sua matriz, a VPU segue um padrão de tendência semelhante ao da resistência à compressão após os 200°C. Esse comportamento da curva de VPU pode não estar associado unicamente à porosidade, mas também à maior formação de microfissuras no CC e no CAA.

Figura 31 – Correlação entre resistência à compressão e VPU normalizados



Fonte: elaborado pelo autor.

Com o objetivo de avaliar a significância dos fatores controláveis, conduziu-se uma análise de variância entre grupos (ANOVA) para um experimento fatorial com dois fatores e um nível de significância de 5%. Os valores utilizados para a análise de variância foram as resistências observadas nos três corpos de prova de cada patamar de temperatura para cada família de concreto. Os resultados da análise ANOVA são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Análise ANOVA para resistência à compressão em função da temperatura

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade (%)	Significância
Concreto (A)	586,76	2	293,38	117,64	0,00000000000006	Significativo
Temperatura (B)	7032,98	4	1758,25	705,01	0,00000000000000	Significativo
AB	33,07	8	4,13	1,66	15,0343729490400	Não significativo
Erro (ruído)	74,82	30	2,49	-	-	-
Total	7727,63	44	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

A temperatura de exposição foi o fator controlável que mais exerceu influência significativa na redução da resistência à compressão dos concretos, seguido pelo tipo de concreto utilizado. No entanto, a interação entre esses dois fatores, representada por “AB”, não demonstrou significância. Portanto, a forma como o traço influi na resistência à compressão não muda com a temperatura ou a forma como a temperatura influi sobre a resistência à compressão não muda com traço, ou seja, os efeitos de cada um dos fatores são independentes.

Dessa forma, como análise complementar, realizou-se a comparação múltipla de médias, de forma que fosse possível averiguar se a diferença entre elas supera o limite de decisão fixado em 5%. Sendo assim, foi possível afirmar quais médias possuem diferença significativa. Na Tabela 40 são apresentados os resultados para a comparação múltipla de médias do fator controlável do tipo de concreto utilizado e na Tabela 41 são apresentados os resultados para o fator controlável das elevadas temperaturas investigadas.

Tabela 40 – Comparação múltipla de médias – resistência à compressão em função do tipo de concreto

Temperatura (°C)	Concreto	Diferença	Resultado
Ambiente	CC x CAA	-3,7008	Diferentes
	CC x CAA-RCV	-6,8379	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-3,1371	Diferentes
200	CC x CAA	-3,3235	Diferentes
	CC x CAA-RCV	-9,2298	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-5,9063	Diferentes
400	CC x CAA	-1,2124	Iguais
	CC x CAA-RCV	-9,4731	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-8,2607	Diferentes
600	CC x CAA	-2,3652	Iguais
	CC x CAA-RCV	-10,4415	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-8,0763	Diferentes
800	CC x CAA	-1,5428	Iguais
	CC x CAA-RCV	-6,9176	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-5,3748	Diferentes

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 41 – Comparação múltipla de médias – resistência à compressão em função do patamar de temperatura

<b>Concreto</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Diferença</b>	<b>Resultado</b>
CC	Ambiente x 200	3,4549	Diferentes
	Ambiente x 400	11,9699	Diferentes
	Ambiente x 600	24,3484	Diferentes
	Ambiente x 800	32,3773	Diferentes
	200 x 400	8,5150	Diferentes
	200 x 600	20,8936	Diferentes
	200 x 800	28,9224	Diferentes
	400 x 600	12,3785	Diferentes
	400 x 800	20,4074	Diferentes
	600 x 800	8,0289	Diferentes
CAA	Ambiente x 200	3,8323	Diferentes
	Ambiente x 400	14,4583	Diferentes
	Ambiente x 600	25,6841	Diferentes
	Ambiente x 800	34,5353	Diferentes
	200 x 400	10,6261	Diferentes
	200 x 600	21,8518	Diferentes
	200 x 800	30,7030	Diferentes
	400 x 600	11,2257	Diferentes
	400 x 800	20,0770	Diferentes
	600 x 800	8,8512	Diferentes
CAA-RCV	Ambiente x 200	1,0630	Iguais
	Ambiente x 400	9,3347	Diferentes
	Ambiente x 600	20,7448	Diferentes
	Ambiente x 800	32,2976	Diferentes
	200 x 400	8,2717	Diferentes
	200 x 600	19,6818	Diferentes
	200 x 800	31,2346	Diferentes
	400 x 600	11,4101	Diferentes
	400 x 800	22,9629	Diferentes
	600 x 800	11,5528	Diferentes

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos resultados da comparação múltipla de médias da resistência à compressão em função do tipo de concreto, é possível constatar que a perda de resistência do CAA a partir de 400°C resultou em uma resistência igual à do CC. Em contrapartida, em todos os patamares de temperatura investigados, o CAA-RCV apresentou resistências à compressão significativamente superiores. Além disso, a maior diferença de resistência foi observada entre o CC e o CAA-RCV a 600°C, já entre o CAA e o CAA-RCV, a maior diferença registrada foi para o patamar de 400°C, com a diferença de resistência diminuindo nos níveis de temperatura subsequentes.

Com base nos resultados da comparação múltiplas de médias da resistência à compressão em função do patamar de temperatura, é possível averiguar que todas as temperaturas influenciaram significativamente na perda de resistência à compressão, exceto para o CAA-RCV à 200°C, no qual a perda de resistência à compressão não foi significativa, mantendo-se semelhante à resistência na temperatura ambiente.

#### 4.3.5 Módulo de elasticidade ambiente e após aquecimento

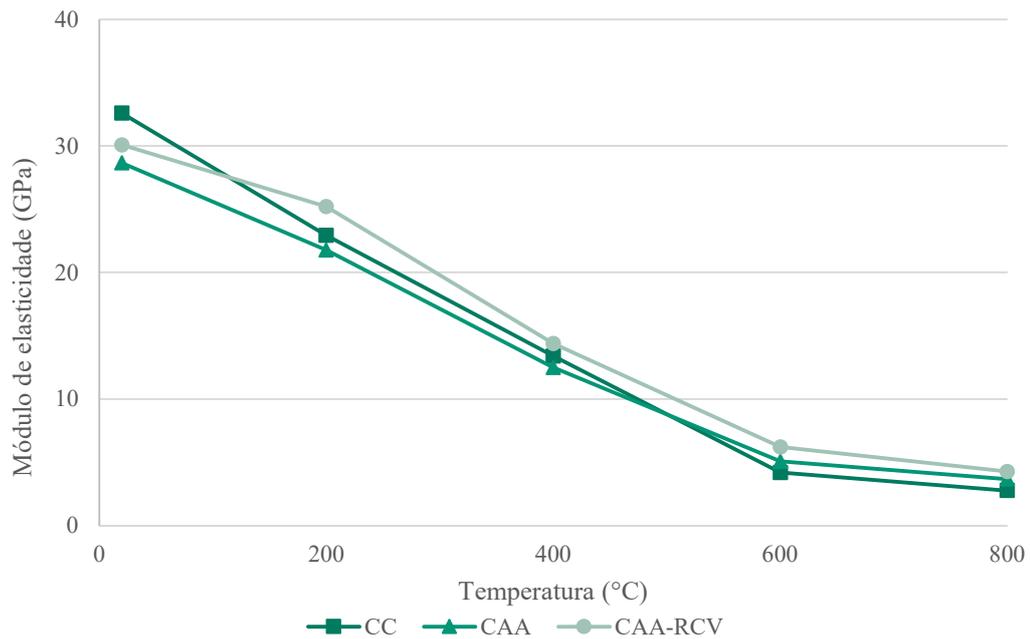
O conhecimento do módulo de elasticidade pode auxiliar na previsão de deformações e contribuir para o cálculo das tensões resultantes da retração. Para a determinação desse parâmetro, utilizou-se a Metodologia A – Tensão  $\sigma_a$  fixa, fornecida pela NBR 8522-1 (ABNT, 2021a). Entretanto, diferentemente da norma, que orienta a utilização da média da resistência à compressão de dois corpos de prova para a determinação da tensão fixa, optou-se por utilizar a média de três corpos de prova rompidos para cada patamar de temperatura. Os dados individuais de cada corpo de prova são apresentados no APÊNDICE I, a média do módulo de elasticidade obtido para cada temperatura são apresentados na Tabela 42 e os resultados médios obtidos são apresentados na Figura 32.

Tabela 42 – Módulo de elasticidade médio (GPa)

Temperatura (°C)	CC		CAA		CAA-RCV	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Ambiente	32,60	0,689	28,66	0,421	30,09	0,831
200	22,93	0,742	21,78	0,514	25,21	0,420
400	13,39	0,173	12,49	0,275	14,39	0,283
600	4,18	0,011	5,08	0,087	6,21	0,250
800	2,77	0,050	3,68	0,121	4,27	0,180

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 32 – Módulo de elasticidade médio em função da temperatura



Fonte: elaborado pelo autor.

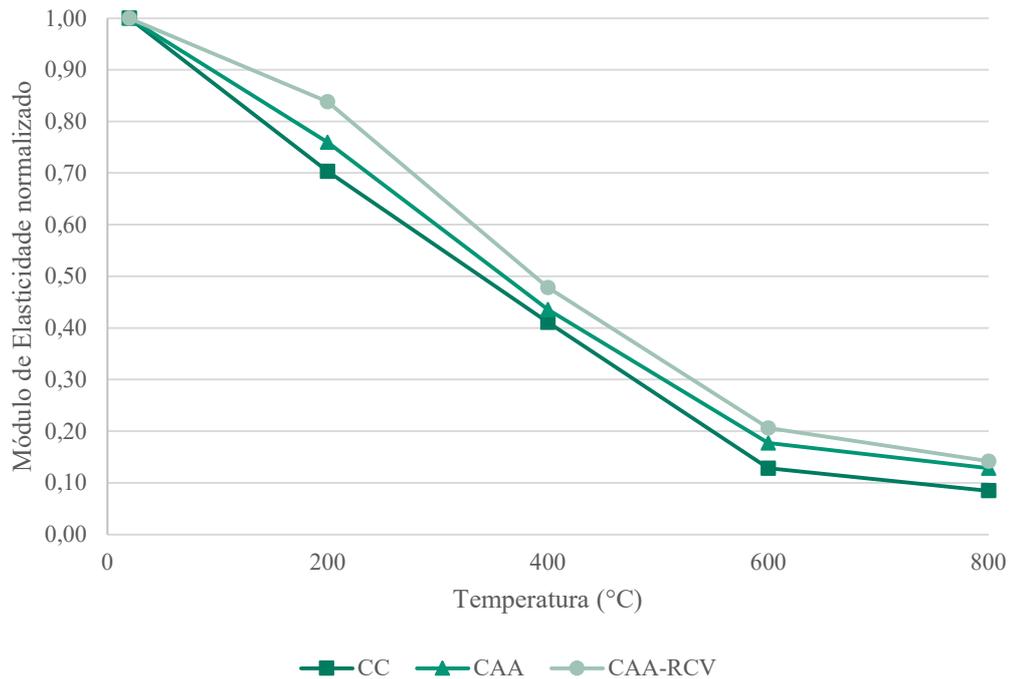
Na Tabela 43 são apresentados os valores residuais do módulo de elasticidade normalizados e na Figura 33 são apresentados os resultados em forma de gráfico. A partir dos dados, foi possível observar que o CAA-RCV apresentou valores superiores para cada patamar de temperatura quando comparado ao CC e ao CAA. Ademais, foi possível observar que o patamar de temperatura de 600°C foi o que mais afetou os concretos, com a maior variação de módulo em relação ao módulo do patamar de temperatura anterior.

Tabela 43 – Módulo de elasticidade normalizados

Temperatura (°C)	CC	CAA	CAA-RCV
Ambiente	1,00	1,00	1,00
200	0,70	0,76	0,84
400	0,41	0,44	0,48
600	0,13	0,18	0,21
800	0,08	0,13	0,14

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 33 – Módulo de elasticidade normalizado em função da temperatura



Fonte: elaborado pelo autor.

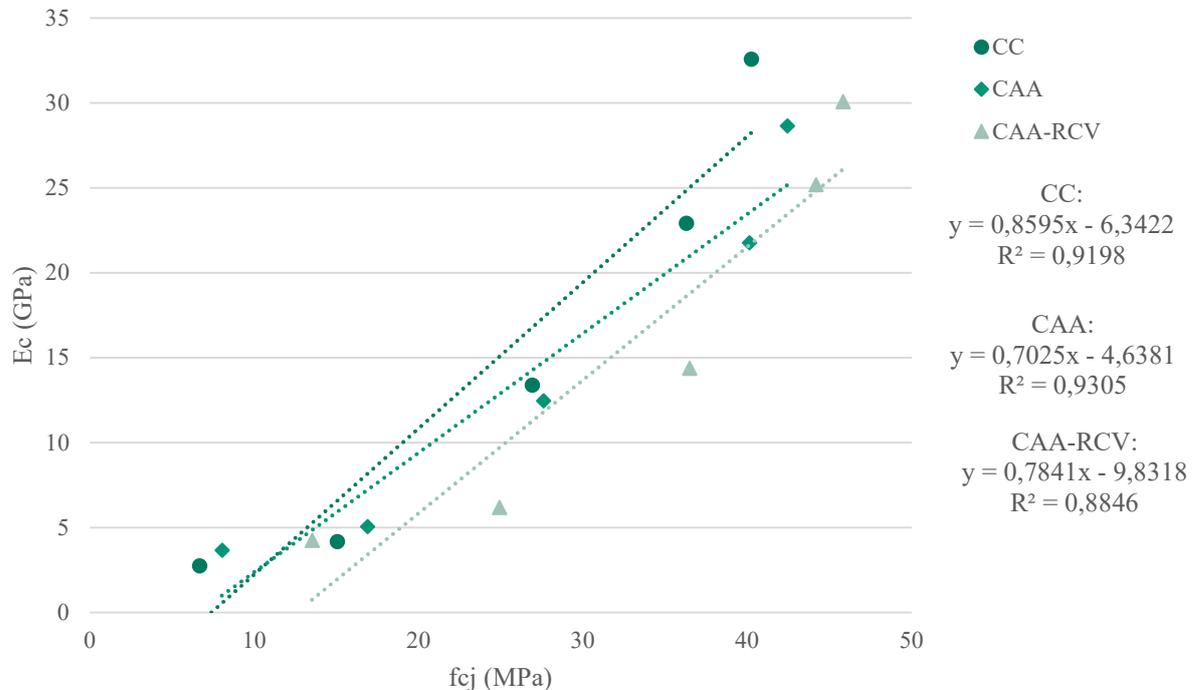
O CC foi o que sofreu maior degradação no módulo de elasticidade, diminuindo 92% quando comparado o patamar de 800 °C com a temperatura ambiente. Já o CAA e o CAA-RCV perderam 87% e 86% do seu módulo de elasticidade em relação à temperatura ambiente.

De modo a comparar os resultados de módulo de elasticidade residual com a resistência à compressão residual, foram traçadas as curvas de correlação na Figura 34 e determinadas as curvas de regressão do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão, para os patamares de temperatura investigados.

Apesar dos resultados mais favoráveis do módulo de elasticidade residual do CAA-RCV em função dos patamares de temperatura, ao realizar os ajustes de regressão com valores de resistência à compressão fixados, é possível observar que seu módulo de elasticidade é inferior em comparação com as outras duas famílias de concreto. Isso pode estar relacionado à porosidade inerente do RCV utilizado como *filler* na matriz do concreto, uma vez que essa propriedade pode influenciar na rigidez do concreto e, conseqüentemente, decrescer os valores de módulo. Segundo Santos (2018), o módulo de elasticidade dos concretos é uma das propriedades que tende a decrescer com a substituição de agregados naturais por agregados reciclados, devido ao fato desse material ser mais poroso, influenciando na rigidez do concreto.

Ademais, ao fixar os valores de resistência à compressão, o CC apresentou resultados superiores em relação aos outros dois tipos de concreto, apresentando valores para a resistência de 40MPa em torno de 26,00 e 39,96% para o CAA e o CAA-RCV, respectivamente.

Figura 34 – Correlação – Módulo de elasticidade X Resistência à compressão



Fonte: elaborado pelo autor.

Da mesma forma que se realizou uma análise de variância entre grupos (ANOVA) para os resultados de resistência à compressão, o mesmo procedimento foi realizado para os dados de módulo de elasticidade. O objetivo foi determinar a significância dos fatores, a partir de um experimento fatorial com dois fatores controláveis e um nível de significância de 5%. Os valores utilizados para a análise de variância foram os módulos observados nos três corpos de prova de cada patamar de temperatura para cada família de concreto. Os resultados da análise ANOVA são apresentados na Tabela 44.

Todos os fatores exerceram influência significativa no módulo de elasticidade. A temperatura de exposição foi o fator controlável que mais influenciou na redução do módulo, seguido pela interação entre a temperatura e o tipo de concreto, representada por “AB”, e, por último, o tipo de concreto utilizado.

Tabela 44 – Análise ANOVA para módulo de elasticidade em função da temperatura

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Probabilidade (%)	Significância
Concreto (A)	21,05	2	10,52	57,92	0,0000000049926	Significativo
Temperatura (B)	4821,13	4	1205,28	6633,63	0,0000000000000	Significativo
AB	35,43	8	4,43	24,38	0,0000000040880	Significativo
Erro (ruído)	5,45	30	0,18	-	-	-
Total	4883,06	44	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Adicionalmente, conduziu-se uma análise de comparação múltipla de médias para determinar se as diferenças entre elas excedem o limite de decisão estabelecido em 5%. Isso permitiu identificar quais as médias apresentam diferença significativa. Na Tabela 45 são apresentados os resultados para o fator controlável das elevadas temperaturas investigadas e na Tabela 46 são apresentados os resultados para a comparação múltipla de médias do fator controlável do tipo de concreto utilizado.

A partir dos resultados da comparação múltiplas de médias do módulo de elasticidade em função do tipo de concreto, é possível constatar que todos os concretos exerceram influência significativa no módulo de elasticidade. No entanto, a diferença entre o CAA e o CAA-RCV a 800°C foi tão pequena que resultou em valores consideravelmente iguais.

Com base nos resultados da comparação múltiplas de médias do módulo de elasticidade em função do patamar de temperatura, é possível averiguar que todas as temperaturas influenciaram significativamente na diminuição do módulo de elasticidade.

Tabela 45 – Comparação múltipla de média – módulo elasticidade em função do patamar de temperatura

<b>Concreto</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Diferença</b>	<b>Resultado</b>
CC	Ambiente x 200	9,6716	Diferentes
	Ambiente x 400	19,2060	Diferentes
	Ambiente x 600	28,2692	Diferentes
	Ambiente x 800	29,8331	Diferentes
	200 x 400	9,5344	Diferentes
	200 x 600	18,5976	Diferentes
	200 x 800	20,1615	Diferentes
	400 x 600	9,0632	Diferentes
	400 x 800	10,6271	Diferentes
	600 x 800	1,5639	Diferentes
CAA	Ambiente x 200	6,8839	Diferentes
	Ambiente x 400	16,1756	Diferentes
	Ambiente x 600	23,5813	Diferentes
	Ambiente x 800	24,8778	Diferentes
	200 x 400	9,2917	Diferentes
	200 x 600	16,6974	Diferentes
	200 x 800	17,9939	Diferentes
	400 x 600	7,4056	Diferentes
	400 x 800	8,7021	Diferentes
	600 x 800	1,2965	Diferentes
CAA-RCV	Ambiente x 200	4,8793	Diferentes
	Ambiente x 400	15,7002	Diferentes
	Ambiente x 600	23,8810	Diferentes
	Ambiente x 800	25,8173	Diferentes
	200 x 400	10,8209	Diferentes
	200 x 600	19,0016	Diferentes
	200 x 800	20,9380	Diferentes
	400 x 600	8,1807	Diferentes
	400 x 800	10,1170	Diferentes
	600 x 800	1,9363	Diferentes

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 46 – Comparação múltipla de média – módulo de elasticidade em função do tipo de concreto

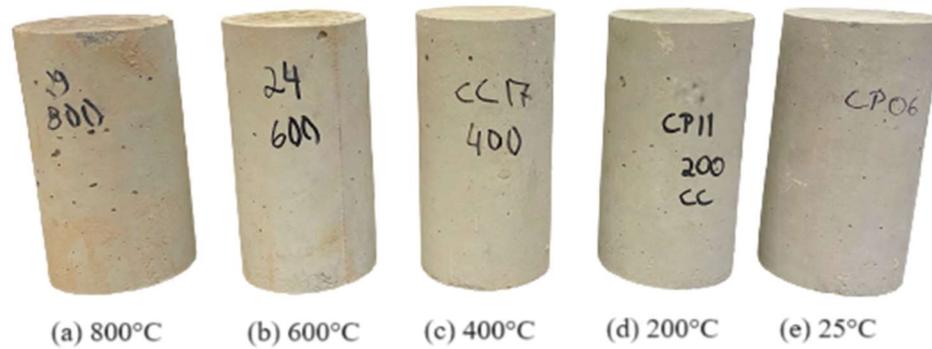
Temperatura (°C)	Concreto	Diferença	Resultado
Ambiente	CC x CAA	3,9358	Diferentes
	CC x CAA-RCV	2,5087	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-1,4271	Diferentes
200	CC x CAA	1,1481	Diferentes
	CC x CAA-RCV	-2,2836	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-3,4317	Diferentes
400	CC x CAA	0,9055	Diferentes
	CC x CAA-RCV	-0,9970	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-1,9025	Diferentes
600	CC x CAA	-0,7521	Diferentes
	CC x CAA-RCV	-1,8795	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-1,1274	Diferentes
800	CC x CAA	-1,0195	Diferentes
	CC x CAA-RCV	-1,5071	Diferentes
	CAA x CAA-RCV	-0,4876	Iguais

Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.3.6 Avaliação visual de fissuras e *spalling*

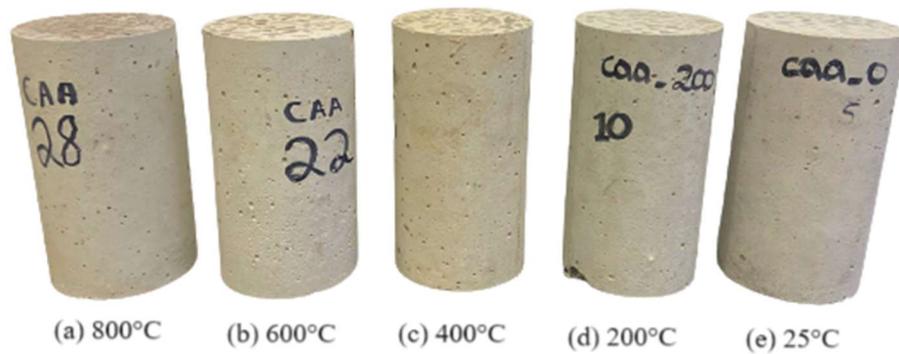
Não foram observados casos de *spalling* nos corpos de prova que passaram pelo processo de sazonalidade e foram submetidos aos patamares elevados de temperatura. Apesar da possível presença de pequenas fissuras superficiais ou microfissuras internas, não foram registradas fragmentação, rachaduras ou desintegrações significativas, independentemente da família de concreto investigada. Na Figura 35, Figura 36 e Figura 37 são apresentados os corpos de prova que tiveram suas propriedades mecânicas residuais investigadas, após serem submetidos aos patamares de elevadas temperaturas.

Figura 35 – CC após exposição a elevadas temperaturas



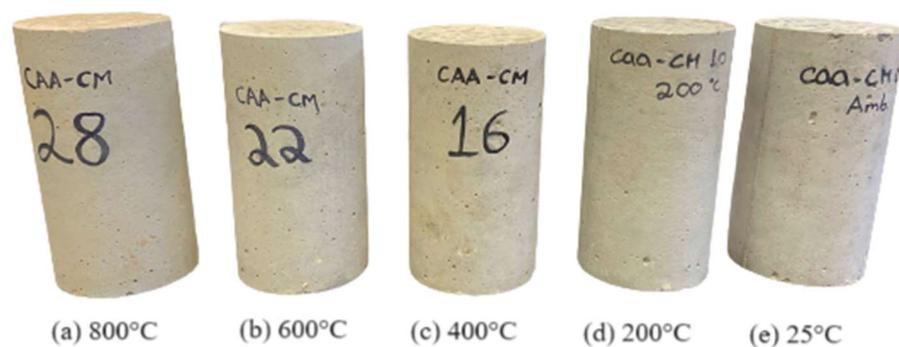
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 36 – CAA após exposição a elevadas temperaturas



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 37 – CAA-RCV após exposição a elevadas temperaturas



Fonte: elaborado pelo autor.

O objetivo de sazonar os corpos de prova foi de assegurar sua integridade para a realização dos ensaios mecânicos. Entretanto, como análise adicional, três corpos de prova de cada família de concreto não foram sazoados e foram expostos a uma taxa elevada de aquecimento, de

27°C/min, até atingirem a temperatura de 1000 °C. A finalidade desse procedimento foi de induzir deliberadamente a ocorrência de *spalling* e avaliar se a porosidade inerente do RCV poderia reduzir a ocorrência de fragmentação explosiva.

Os corpos de prova foram transferidos diretamente da câmara úmida para o forno. Todos os corpos de prova investigados possuíam o traço intermediário. Na Figura 38 são apresentados os corpos de prova do CC, na Figura 39 os corpos de prova do CAA e na Figura 40 os corpos de prova do CAA-RCV, imediatamente após o processo de aquecimento.

Figura 38 – Análise de *spalling* do CC



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 39 – Análise de *spalling* do CAA



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 40 – Análise de *spalling* do CAA-RCV

Fonte: elaborado pelo autor.

Durante o processo de aquecimento, a evolução da temperatura no forno foi monitorada e procurou-se identificar de forma auditiva a ocorrência de *spalling*. Os corpos de prova de CC mantiveram sua integridade, apresentando apenas fissuras superficiais e perda de massa devido à evaporação da água, conforme ilustrado na Figura 41. Por outro lado, o CAA apresentou *spalling* explosivo a partir da temperatura de 607 °C, com todos os três corpos de prova perdendo completamente a sua integridade. No CAA, o *spalling* explosivo é causado principalmente pela tensão desenvolvida, pela relação água/aglomerante e pela relação cimento/aglomerante. Maiores quantidades de *filler* no CAA reduzem a porosidade e tornaram o CAA mais vulnerável e suscetível à fragmentação (Rao; Kumar, 2023). Já o CAA-RCV apresentou pequenos estalos aos 594 °C, e um dos corpos de prova sofreu *spalling* explosivo ao atingir a temperatura de 715°C.

Figura 41 – Fissuras no CC após elevada taxa de aquecimento



Fonte: elaborado pelo autor.

De acordo com Hertz (2003), a fragmentação é resultado do acúmulo de pressão nos poros durante o aquecimento. Quando a poropressão efetiva excede a resistência à tração do concreto, fragmentos do material se desprendem do elemento estrutural, dessa forma, quanto menor a permeabilidade do concreto, maior será o lascamento induzido pelo fogo. Por outro lado, Kodur e Phan (2007) afirmam que diversos fatores, como resistência, porosidade, densidade, nível de carga, intensidade do fogo, tipo de agregado, umidade relativa, tipo e quantidade de aditivos, podem influenciar na ocorrência de *spalling*. Muitos desses fatores estão interligados, tornando a previsão do *spalling* um desafio complexo. Sendo assim, é importante destacar que, devido à limitação na quantidade de corpos de prova analisados (apenas três corpos de prova de cada família de concreto de um mesmo traço), a repetição do ensaio se faz necessária para obter resultados mais conclusivos. No entanto, com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o CC apresentou o melhor desempenho em relação à rápida taxa de aquecimento do forno. Por outro lado, o CAA mostrou o pior comportamento frente às elevadas temperaturas, desintegrando-se completamente, comportamento esse semelhante ao relatado anteriormente na literatura (Andiç-Çakır; Hizal, 2012; Franchetto, 2022). Apesar do CAA-RCV apresentar um comportamento melhor do que o CAA, não é possível afirmar com convicção de que o RCV evita a ocorrência *spalling* explosivo, entretanto, a partir dos três corpos de prova analisados, constatou-se que a presença desse resíduo como *filler* contribuiu para reduzir a ocorrência de fragmentação explosiva. Mais estudos e repetições do ensaio são necessários para uma avaliação mais abrangente e conclusiva.

#### 4.4 ANÁLISE DE CUSTO

Neste item são apresentados e mensurados os custos que a utilização do RCV no concreto autoadensável pode gerar em comparação ao concreto convencional e ao concreto autoadensável com *filler* de areia.

Os custos associados à produção do RCV podem variar consideravelmente, levando em conta fatores como a localização da coleta do resíduo, a granulometria do material coletado, o método de moagem adotado, dentre outros parâmetros relevantes. Para fins de cálculo da presente pesquisa, considerou-se o período de 2 horas despendido na operação de moagem do resíduo, conforme descrito no item 3.2.6.1, juntamente com o processo de peneiramento do resíduo. Quanto ao custo associado ao consumo de energia elétrica, expresso em kWh, este foi estimado com base nas informações fornecidas pela CEEE (2022), empresa encarregada da distribuição de energia elétrica na região de Porto Alegre.

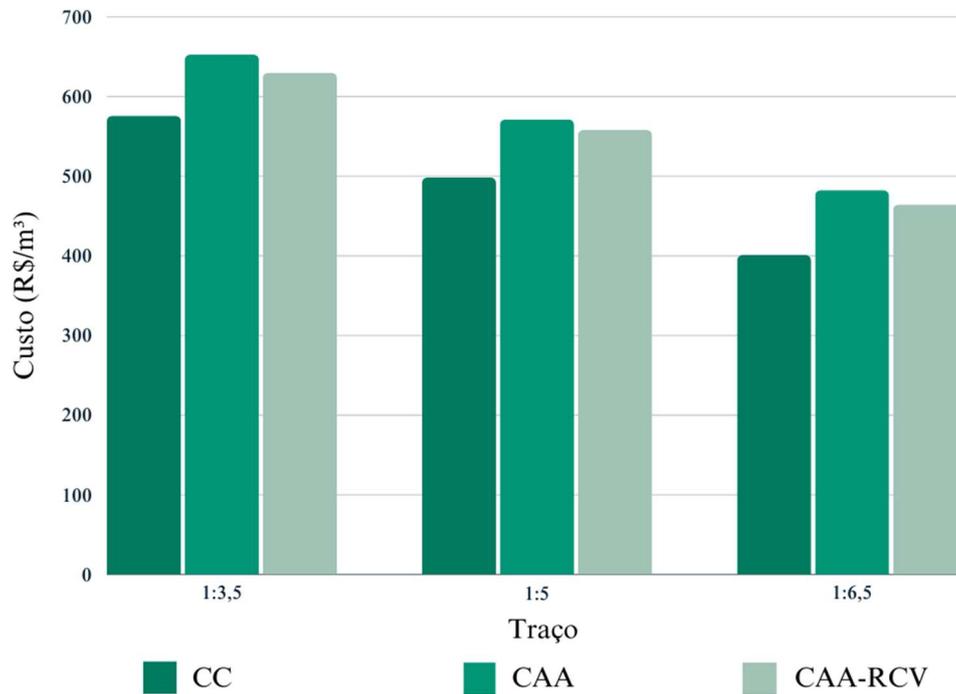
Além disso, foram adotados para o cimento CPV-ARI e o *filler* de areia os preços dos fornecedores utilizados nessa pesquisa. Para os demais materiais, os custos foram estimados com base nos preços de insumos do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), referentes ao mês de junho de 2023 para o Estado do Rio Grande do Sul. Cabe ressaltar que, dado que a análise se concentrou nos materiais da fonte primária até o portão, os custos de transporte foram desconsiderados. A Tabela 47 apresenta os preços dos materiais em R\$/kg utilizados para o cálculo.

Tabela 47 – Custo dos materiais utilizados para a produção dos concretos, em R\$/kg

<b>Material</b>	<b>Custo (R\$/kg)</b>
CPV-ARI	0,938
Brita 0	0,069 (CAIXA, 2023)
Areia média natural	0,057 (CAIXA, 2023)
<i>Filler</i> de areia	0,300
<i>Filler</i> de RCV	0,151
Aditivo superplastificante	19,90 (CAIXA, 2023)

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos dados de cada material, chegou-se num custo para cada traço e família de concreto, conforme apresentando na Figura 42.

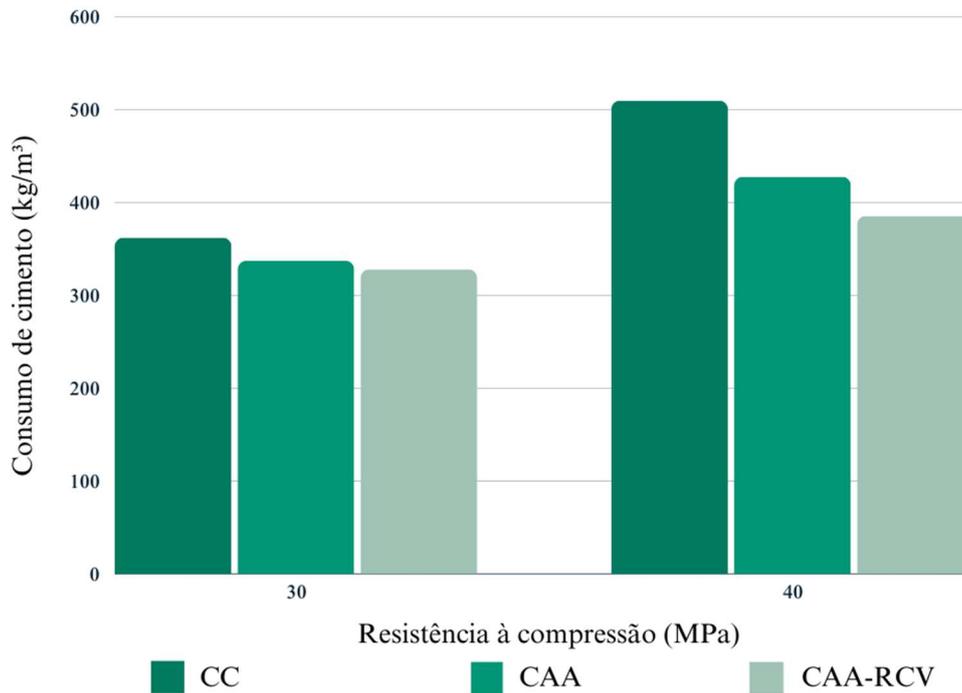
Figura 42 – Custo do concreto por m<sup>3</sup>

Fonte: elaborado pelo autor.

É perceptível que, apesar do CAA-RCV necessitar do processo de beneficiamento para o *filler*, o seu custo por metro cúbico fica quase equiparado ao do CAA. Em contrapartida, o CC apresenta o menor custo para todos os traços, devido ao baixo consumo de cimento por metro cúbico e ao custo atrelado à utilização de *filler*.

Adicionalmente, foi calculado o consumo de cimento utilizando-se a resistência à compressão como parâmetro fixo do concreto. Na Figura 43 são apresentados os valores encontrados para os níveis de resistência à compressão de 30 e 40 MPa, aos 28 dias.

Figura 43 – Consumo de cimento em função da resistência à compressão



Fonte: elaborado pelo autor.

Apesar do CAA ser classificado como um concreto de alto desempenho, a partir do gráfico acima é possível perceber que o consumo de cimento para uma mesma resistência é muito menor para o CAA-RCV. Tal fato pode ser atrelado à reação pozolânica causada pelos teores de sílica e alumina dos agregados cerâmicos com o produto de hidratação do cimento, corroborando para resistências superiores. Portanto, pode-se observar que o uso de RCV é viável para a produção de CAA em termos de custos econômicos e apresenta potencial para reduzir emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que possibilita a redução do uso de cimento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados experimentais, as conclusões desse estudo são delineadas neste capítulo. Adicionalmente, são fornecidas recomendações para pesquisas futuras, visando dar sequência à investigação do comportamento de concretos autoadensáveis com a incorporação de RCV sob a influência de elevadas temperaturas.

### 5.1 CONCLUSÕES

Esse estudo explorou o emprego do *filler* de areia e de *filler* oriundo do beneficiamento de resíduos da indústria de cerâmica vermelha no CAA, com a finalidade de avaliar as suas potencialidades como substituto parcial do agregado miúdo natural, de modo a conferir o impacto perante as propriedades mecânicas residuais após a exposição a elevadas temperaturas. Dessa forma, o estudo busca contribuir não apenas para a mitigação dos efeitos adversos das elevadas temperaturas, como também, colaborar para encontrar um novo destino para o RCV.

A partir da dosagem experimental, constatou-se que a quantidade de material fino requerida para a incorporação em concretos autoadensáveis não ultrapassa os 20% de substituição do agregado miúdo natural. Assim, percebe-se que não são necessários teores tão elevados de *filler* para alcançar as características fundamentais de autoadensabilidade, mantendo-se a relação de água e aditivo adicionada na mistura. Contudo, recomenda-se que seja realizado um processo de beneficiamento por meio da moagem do resíduo, de forma que sua granulometria seja adequada para ser aplicada como *filler* no CAA.

Os resultados dos ensaios no estado fresco do CAA-RCV atenderam a todos os requisitos de aceitação estabelecidos pela norma vigente, quanto à fluidez e à resistência à segregação dos agregados. Os ensaios de espalhamento alcançaram níveis de aceitação à classe SF2, com diâmetros que variaram de 656 a 780 mm.

Quanto à resistência à compressão, os resultados apontaram que é viável o emprego de *filler* de RCV no CAA, em substituição ao agregado miúdo natural. Todavia, percebe-se que a resistência dos concretos é influenciada pela origem do material, sendo de fundamental importância prever a moagem e peneiramento do resíduo. Quanto à resistência à compressão sob influência de elevadas temperaturas, concluiu-se que as três famílias de concretos sofreram reduções, conforme o aumento das temperaturas, principalmente na faixa de aquecimento entre

400 e 600°C. Ao comparar os fatores de redução da resistência com os previstos pela NBR 15200 (ABNT, 2012b), destaca-se que a única família a apresentar fatores a favor da segurança para todos os patamares de aquecimento foi o CAA-RCV.

Ainda retratando sobre as propriedades mecânicas dos concretos, percebeu-se que a adição de *filler* de RCV resultou em valores mais baixos para o módulo de elasticidade quando fixado o valor de resistência à compressão. Ademais, observou-se que a redução do módulo de elasticidade foi mais acentuada em comparação à redução da resistência à compressão.

Adicionalmente, observou-se que a deterioração térmica das propriedades mecânicas é mais intensa e que suas propriedades são afetadas à medida que ocorre o aumento térmico. Portanto, concluiu-se que o processo de cura escolhido, prevendo a etapa de sazonalamento, desempenhou um papel fundamental para garantir a integridade dos corpos de prova durante e após os aquecimentos. Por outro lado, constatou-se que a ausência de sazonalamento nos corpos de prova do CAA pode representar um risco em ensaios, podendo levar à completa ruptura do concreto por *spalling* explosivo. Além disso, apesar de verificar uma melhora visual do comportamento do CAA-RCV, sugere-se que investigações mais aprofundadas sobre o tema sejam realizadas, de forma a mensurar os efeitos desse fenômeno sobre os concretos autoadensáveis.

O ensaio de absorção de água por capilaridade do CAA-RCV apresentou resultados superiores em relação ao CC e ao CAA. Esse resultado está atrelado à porosidade inerente do RCV, que é mais elevada em relação aos outros materiais utilizados. Esse resultado confere uma menor previsão de durabilidade, tornando-o mais suscetível à absorção de água e ao ataque de cloretos. Em contrapartida, a capacidade de absorção de água pelos poros capilares provavelmente contribuiu para um melhor comportamento do CAA-RCV frente às elevadas taxas de aquecimento de temperatura, reduzindo a incidência de *spalling*.

Semelhantemente à resistência à compressão, a análise da degradação das propriedades mecânicas por meio do ensaio de VPU indicou que a faixa de temperatura entre 400 e 600°C foi a mais crítica para todas as famílias de concreto. Além disso, o CAA-RCV apresentou resultados superiores, principalmente quando comparado ao CC após os 400 °C. Isso se deve às possíveis microfissuras e evaporação de água dos poros geradas nos corpos de prova quando submetido à ação das elevadas temperaturas.

A análise de custo dos concretos autoadensáveis mostrou que é viável a utilização de RCV como substituto da fração fina do agregado natural, uma vez que se obteve valores equiparados ao do concreto autoadensável com *filler* de areia. Além disso, ao fixar a resistência à compressão, o CAA-RCV apresentou uma diminuição do consumo de cimento em comparação ao CC de referência e ao CAA.

Assim sendo, esse estudo desempenhou um papel na avaliação do emprego de RCV em concretos autoadensáveis em elevadas temperaturas, acreditando na sua possível adoção no setor da construção civil.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, têm-se:

Realizar ensaios adicionais no estado fresco, com ênfase no entendimento do impacto da incorporação de RCV em misturas para elementos estruturais armados;

Realizar análises estruturais em concretos autoadensáveis com RCV para diferentes elementos, como vigas e lajes;

Investigar o teor de umidade crítico no qual o fenômeno de *spalling* não ocorre e submeter diferentes traços a elevadas temperaturas em diferentes taxas de aquecimento, a fim de aprofundar o entendimento da influência do RCV na ocorrência desse fenômeno;

Após exposição a elevadas temperaturas, armazenar os corpos de prova em ambientes diferentes, câmara úmida e câmara seca, e realizar ensaios em diferentes períodos de exposição. Dessa forma será possível acompanhar os efeitos dos processos de reidratação sobre as características estudadas;

Investigar a influência da forma e textura do RCV nas propriedades reológicas dos concretos autoadensáveis;

Avaliar a durabilidade do CAA com *filler* de RCV quanto à carbonatação, ataque por íons cloreto e retração;

Avaliar numericamente os benefícios ambientais em função da resistência à compressão e módulo de elasticidade ao incorporar o RCV no CAA;

Essas sugestões visam expandir o conhecimento sobre o uso de RCV em concretos autoadensáveis e explorar várias facetas relacionadas ao desempenho e à sustentabilidade desses materiais.

## REFERÊNCIAS

- ABDULRAZZAQ, Oday A. Effect of Clay Bricks Powder on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete. **Iraqi Journal of Civil Engineering**, Iraque, v. 12, n. 2, p. 78-89, set. 2017.
- ABED, Mohammed; BRITO, Jorge de. Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by non-destructive testing. **Journal of Building Engineering**, Budapeste, v. 32, p. 1-9, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101720>.
- ABED, Mohammed; NEMES, Rita; LUBLÓY, Éva. Performance of Self-Compacting High-Performance Concrete Produced with Waste Materials after Exposure to Elevated Temperature. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Budapeste, v. 32, n.1, p. 1-10, jan. 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002989](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002989).
- ACHAK, Hamed; SOHRABI, Mohammad Reza; HOSEINI, Seyed Omid. Effects of microsilica and polypropylene fibers on the rheological properties, mechanical parameters and durability characteristics of green self-compacting concrete containing ceramic wastes. **Construction and Building Materials**, Zahedan, v. 392, p. 1-16, ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131890>.
- AKSOYLU, Ceyhun; ÖZKILIÇ, Yasin Onuralp; BAHRAMI, Alireza; YILDIZEL, Sadik Alper; HAKEEM, Ibrahim Y.; ÖZDÖNER, Nebi; BASARAN, Bogaçhan; KARALAR, Memduh. Application of waste ceramic powder as a cement replacement in reinforced concrete beams toward sustainable usage in construction. **Case Studies in Construction Materials**, Konya, v. 19, p. 1-15, set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02444>.
- ALCHARCHAFCHE, Mahmood Anwar Shaker; AL-MASHHADANI, Mukhallad M.; AYGÖRMEZ, Yurdakul. Investigation of mechanical and durability properties of brick powder-added White Cement composites with three different fibers. **Construction and Building Materials**, Turquia, v. 347, p. 1-19, set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128548>.
- ALI, Sama T.; EL-DIEB, Amr Salah; ABOUBAKR, Sherif H.; TAHA, Mahmoud Reda. Utilization of Ceramic Waste Powder in Self-Compacting Concrete. *In: Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4)*, 4., 2016, Estados Unidos. **Anais** [...]. Estados Unidos: 2016. P. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.18552/2016/SCMT4S116>.
- ALIZADEH, Seyed Mehrdad Mousavi; REZAEIAN, Abbas; RASOOLAN, Iraj; TAHMOURESI, Behzad. Compressive stress-strain model and residual strength of self-compacting concrete containing recycled ceramic aggregate after exposure to fire. **Journal of Building Engineering**, Irã, v. 38, p. 1-15, jun. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102206>.
- AL-KADI, Qahir N. S.; ALHASANA, Mahmoud B.; AL QADI, Arabi N. S. Spalling Assessment of Self-Compacting Concrete with and Without Polypropylene Fibres at Elevated Temperatures. **International Journal of Engineering Research and Applications**, Jordânia, v. 6, n. 6, p. 82-93, jun. 2016.

AL-KROOM, Hussein; ATYIA, May M.; MAHDY, Mohamed G.; ABD ELRAHMAN, Mohamed. The effect of finely-grinded crushed brick powder on physical and microstructural characteristics of lightweight concrete. **Minerals**, Jordânia, v. 12, n. 159, p. 1-17, jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12020159>.

ALMEIDA, Jacinto Manuel Antunes de. **Comportamento em altas temperaturas e na reidratação de concretos convencional e com cinza de casca de arroz**. 2017. 312 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ALOBAIDI, Yusra M.; HILAL, Nahla N.; FARAJ, Rabar H. An experimental investigation on the nano-fly ash preparation and its effects on the performance of self-compacting concrete at normal and elevated temperatures. **Nanotechnology for Environmental Engineering**, Iraque, v. 6, n. 2, p. 1-13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00098-6>.

ALSUBARI, Belal; SHAFIGH, Payam; IBRAHIM, Zainah; ALNAHHAL, Mohammed Fouad; JUMAAT, Mohd Zamin. Properties of eco-friendly self-compacting concrete containing modified treated pal oil fuel ash. **Construction and Building Materials**, Malásia, v. 158, p. 742-754, jan. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.174>.

ALY, Sama Tarek; EL-DIEB, Amr Salah; TAHA, Mahmoud Reda. Effect of High-Volume Ceramic Waste Powder as Partial Cement Replacement on Fresh and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Emirados Árabes Unidos, v. 31, n. 2, p. 1-11, fev. 2019. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002588](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002588).

AMJADI, Ramin; MONAZAMI, Maryam; MOHSENI, Ehsan; BALGOURI, Hamed Azar; RANJBAR, Malek Mohammad. Effectiveness of different recycled materials in self-compacting mortar. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, Irã, v. 21, n. 12, p. 1485-1501, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1175974>.

ANAGNOSTOPOULOS, N.; SIDERIS, K. K.; GEORGIADIS, A. Mechanical characteristics of self-compacting concretes with different filler materials, exposed to elevated temperatures. **Materials and Structures**, Grécia, v. 42, p. 1393-1405, dez. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9459-6>

ANAND, N; ARULRAJ, P. Effect of Grade of Concrete on the Performance of Self-Compacting Concrete Beams Subjected to Elevated Temperatures. **Fire Technology**, Índia, v. 50, p. 1269-1284, set. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-013-0345-6>.

ANAND, N; GODWIN, A.; ARULRAJ, P. Influence of mineral admixtures on mechanical properties of self-compacting concrete under elevated temperature. **Fire And Materials**, Índia, v. 40, n. 7, p. 940-958, out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2353>.

ANDIÇ-ÇAKIR, Özge; HIZAL, Selim. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and micro-structure of self-consolidating light-weight aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, Budapeste, v. 34, p. 575-583, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.088>.

ANNEREL, E; TAERWE, L. Evolution of the strains of traditional and self-compacting concrete during and after fire. **Materials and Structures**, Bélgica, v. 44, p. 1369-1380, out. 2011. DOI: <https://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**, Bélgica, v. 37, n. 3, p. 217-229, abr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2126>.

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**, Austrália, v. 30, n. 12, p. 1-19, dez. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002538](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002538).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimentos Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulo estáticos à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual. Rio de Janeiro: ABNT, 2017b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cono. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916**: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16917**: Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17054**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C 1202-97**: Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. Philadelphia: ASTM, 2002.

AZARIJAFARI, Hessam; AMIRI, Mohammad Javad Taheri; ASHRAFIAN, Ali; RASEKH, Haleh; BARFOROOSHI, Maedeh Javaheri; BERENJIAN, Javad. Ternary blended cement: An eco-friendly alternative to improve resistivity of high-performance self-consolidating concrete against elevated temperature. **Journal of Cleaner Production**, EUA, v. 223, p. 575-586, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.054>.

BAKHTIYARI, S.; ALLAHVERDIB, A.; RAIS-GHASEMI, M.; ZARRABI, B. A.; PARHIZKARC, T. Self-compacting concrete containing different powders at elevated temperatures: mechanical properties and changes in the phase composition of the paste. **Thermochimica Acta**, Irã, v. 514, n. 1-2, p. 74-81, fev. 2011. DOI: <https://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**, Itália, v. 45, p. 1375-1387, set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9839-9>.

BAO, Jiuwen; ZHENG, Rui Zheng; ZHANG, Peng; CUI, Yifei; XUE, Shanbin; SONG, Qiang; MA, Yanxuan. Thermal resistance, water absorption and microstructure of high-strength self-compacting lightweight aggregate concrete (HSSC-LWAC) after exposure to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, China, v. 365, p. 1-16, fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130071>.

BASIT, Abdul; KHAN, M Aftab; AHMED, Ibrar; KHAN, M Nasir Ayaz; UMAR, M. Effect of brick dust and lime powder on the performance of plain cement concrete. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, Paquistão, v. 414, p. 1-7, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/414/1/012008>.

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.

BOSILJKOV, Violeta Bokan. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. **Cement And Concrete Research**, Liubliana, v. 33, n. 9, p. 1279-1286, set. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00013-9).

BOURGEOIS, J. C.; WALSH, M. E.; GAGNON, G. A. Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. **Water Research**, Canadá, v. 38, n. 5, p. 1173-1182, mar. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.018>.

BRITISH STANDARD. **BS8110** - Part 2: Structural use of concrete. Code of practice for special circumstances. BSI, Londres, 1985.

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, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

CANBAZ, M. The Effect of High Temperature on Concrete with Waste Ceramic Aggregate. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, Turquia, v. 40, n.1, p. 41-48, abr. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40996-016-0002-7>.

COMPANHIA ESTADUAL DE ENERGIA ELÉTRICA GRUPO EQUATORIAL ENERGIA (CEEE). Tarifas e Custos dos Serviços (Resolução Homologatória ANEEL nº 3.138/2022). 2022. Disponível em: <https://ceee.equatorialenergia.com.br/FolderGrupoB2022.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2023.

CREE, D.; GREEN, M.; NOUMOWÉ, A. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review. **Construction And Building Materials**, Ontario, v. 45, p. 208-223, ago. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.005>.

DEBIEB, Farid; KENAI, Said. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, Argélia, v. 22, n. 5, p. 886-893, maio. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. **DIN EN 1363-1**: Fire resistance tests – Part 1: General requirements. 2020

DMAE (Porto Alegre). Relatórios Mensais (Decreto 5.440/95). 2023. Elaborado por Gerência de Tratamento de Água. Disponível em: [https://prefeitura.poa.br/sites/default/files/usu\\_doc/sites/dmae/01\\_2023\\_decreto5440\\_0.pdf](https://prefeitura.poa.br/sites/default/files/usu_doc/sites/dmae/01_2023_decreto5440_0.pdf). Acesso em: 02 mar. 2023.

EDWARDS, Brian. O guia básico para a sustentabilidade. 2. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2009. 226 p.

EL-NOPY, Ahmed Mohamed; NOAMAN, Mohamed Taha; SELEEM, Mohamed Hassan. Utilization of Filler Materials in Self-Compacting Concrete as a Partial Cement Replacement.

**Tehnički vjesnik**, Egito, v. 29, n. 3, p. 867-874, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17559/TV-20220126141315>.

FARES, Hanaa; NOUMOWE, Albert; REMOND, Sébastien. Self-consolidating concrete subjected to high temperature Mechanical and physicochemical properties. **Cement and Concrete Research**, Cergy-Pontoise, v. 39, n. 12, p. 1230-1238, dez. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.001>.

FARES, Hanaa; REMOND, Sébastien; NOUMOWE, Albert; COUSTURE, Annelise. High temperature behaviour of self-consolidating concrete Microstructure and physicochemical properties. **Cement And Concrete Research**, Cergy-Pontoise, v. 40, n. 3, p. 488-496. mar. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.006>.

FARES, Hanaa; TOUTANJI, Houssam; PIERCE, Kristopher; NOUMOWÉ, Albert. Lightweight Self-Consolidating Concrete Exposed to Elevated Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, França, v. 27, n. 12, p. 1-10, dez. 2015. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001285](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001285)

FÉDÉRATION INTERNACIONALE DU BÉTON (FIB). **Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling** – State-of-art report. Lausanne: FIB. 2007. 97 p.

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

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.

FRANCHETTO, Alessandro Simas. **Investigação das características físicas e propriedades residuais de concretos autoadensáveis expostos a altas temperaturas**. 2022. 238 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR, M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. Avaliação da atividade pozolânica dos resíduos de cerâmica vermelha produzidos nos principais polos ceramistas do Estado de S. Paulo. **Cerâmica**, São Paulo, v. 61, p. 251-258, jun. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132015613581847>.

GARCIA-TRONCOSO, Natividad; LI, Lufan; CHENG, Quan; MO, Kim Hung, LING, Tung-Chai. Comparative study on the properties and high temperature resistance of self-compacting concrete with various types of recycled aggregates. **Case Studies in Construction Materials**, Hunan, v. 15, p. 1-11, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00678>.

GAUTAM, Lilesh; KALLA, Pawan; JAIN, Jinendra Kumar; CHOUDHARY, Rakesh; JAIN, Abhishek. Robustness of self-compacting concrete incorporating bone china ceramic waste powder along with granite cutting waste for sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, Índia, v. 367, p. 1-15, set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132969>.

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. 2021.

GE, Zhi et al. Durability and shrinkage performance of self-compacting concrete containing recycled fine clay brick aggregate. **Construction And Building Materials**, China, v. 308, p. 1-9. nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125041>.

GODWIN, A.; ANAND, N.; ARULRAJ, P.; ARAVINDHAN, C. Influence of Mineral Admixture on Stress Strain Behaviour of Self Compacting Concrete under Elevated Temperature. **Indian Journal of Science and Technology**, Índia, v. 9, n. 6, p. 1-8, fev. 2016. DOI: <https://dx.doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i6/87702>.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R; AGULLÓ, L; TENÓRIO, J. J. L. Concreto auto-adensável um aliado ao desenvolvimento sustentável do concreto. **45º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, Vitória, 2003.

HARIKARAN, M.; BOOPATHI, S.; RAJKANNAN, M.; GOKULAKANNAN, S. Impact analysis of ceramic tile powder aggregates on self-compacting concrete. **Engineering Reserch Express**, Índia, v. 5, n. 2, p. 1-13, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/acde48>.

HE, Ziming; SHEN, Aiqin; WU, Hansong; WANG, Wenzhen; WANG, Lusheng; YAO, Chao; WU, Jinhua. Research progress on recycled clay brick waste as an alternative to cement for sustainable construction materials. **Construction and Building Materials**. China, v. 274, p. 122113-122125, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122113>.

HE, Zhi-hai; ZHU, Hao-nan; ZHANG, Meng-yuan; SHI, Jin-yan; DU, Shi-gui; LIU, Baoju. Autogenous shrinkage and nano-mechanical properties of UHPC containing waste brick powder derived from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**. China, v. 306, p. 1-10, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124869>.

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**, Dinamarca, v. 38, n.2, p. 103-116, nov. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(02\)00051-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6).

HUSSEIN, Yasser M.; ABD ELRAHMAN, Mohamed; ELSAKHAWY, Yara; TAYEH, Bassam A. Tayeh, TAHWIA, Ahmed M. Development and performance of sustainable structural lightweight concrete containing waste clay bricks. **Journal of Materials Research and Technology**, Egito, v. 21, p. 4344-4359, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.042>.

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 21 maio 2023.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION FOR ORGANIZATION. **ISO 834-1**: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. Genève, 1999.

JAIN, Abhishek; GUPTA, Rajesh; GUPTA, Sanchit; CHAUDHARY, Sandeep. Evaluation of real time fire performance of eco-efficient fly ash blended self-consolidating concrete including granite waste. **Journal of Building Engineering**, Rajastão, v. 77, p. 1-14. ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107553>.

JANOTKA, Ivan; MARTAUZ, Pavel; BACUVCÍK, Michal. Design of Concrete Made with Recycled Brick Waste and Its Environmental Performance. **Minerals**, Eslováquia, v. 11, n. 5, p. 1-20, abr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11050463>.

JANSSON, Robert; BOSTRÖM, Lars. Factors influencing fire spalling of self compacting concrete. **Materials and Structures**, Suécia, v. 46, p. 1683-1694. out. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-0007-z>.

JERÔNIMO, Valdith Lopes; MEIRA, Gibson Rocha; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da. Performance of self-compacting concretes with wastes from heavy ceramic industry against corrosion by chlorides. **Construction and Building Materials**, Brasil, v. 169, p. 900-910, abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.034>.

KALIFA, Pierre; MENNETEAU, François-Dominique; QUENARD, Daniel. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. **Cement and Concrete Research**, Saint-Martin D'Hères, v. 30, n. 12, p. 1915-1927. dez. 2000. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00384-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00384-7).

KANAGARAJ, B.; ANAND, N.; ANDRUSHIA, D.; MATHEWS, M. E.; ALENGARAM, J.; ARULRAJ, P.; KIRAN, T. Mechanical Properties and Microstructure Characteristics of Self-compacting Concrete with Different Admixtures Exposed to Elevated Temperatures. **Jordan Journal of Civil Engineering**, Índia, v. 17, n. 1, p. 1-9. abr. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.14525/JJCE.v17i1.01>.

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, UFRGS, Porto Alegre, 2010.

KHOURY, Gabriel A., ANDERBERG, Yngve. Fire safety design, concrete spalling review. **Swedish National Administration**, 2000.

KODUR, V. K. R.; PHAN, L. Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems. **Fire Safety Journal**, Estados Unidos, v. 42, n. 6-7, p. 482-488. set. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.10.006>.

LANEYRIE, Cléo; BEAUCOUR, Anne-Lise; GREEN, Mark F.; HEBERT, Ronan L.; LEDESERT, Béatrice; NOUMOWE, Albert. Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, Cergy-Pontoise, v. 111, p. 368-378. maio. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>.

LI, Shujun; LI Qiuyi; ZHAO, Xiaolong; LUO, Jianlin; GAO, Song Gao; YUE, Gongbing; SU, Dunlei. Experimental Study on the Preparation of Recycled Admixtures by Using Construction and Demolition Waste. **Materials**, China, v. 12, n. 10, p. 1-16, maio 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12101678>.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves de; SILVA FILHO, Luiz Carlos Pinto da; CASONATO, Carlos Adolfo; CAETANO, Luciane Fonseca. O concreto de alto desempenho em temperaturas elevadas. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 5., 2003, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2003. 12p.

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.

MA, Xianwei; WANG, Zhenyu. Effect of Ground Waste Concrete Powder on Cement Properties. **Advances in Materials Science and Engineering**, China, v. 2013, p. 1-5, maio 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/918294>.

MA, Zhiming; LI, Wei; WU, Huixia; CAO, Chengwei. Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste. **Construction and Building Materials**, China, v. 199, p. 652-663, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.065>.

MA, Zhiming; LIU, Miao; DUAN, Zhenhua; LIANG, Chaofeng; WU, Huixia. Effects of active waste powder obtained from C&D waste on the microproperties and water permeability of concrete. **Journal of Cleaner Production**, China, v. 257, p. 1-16, jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120518>.

MANSOR, Ali M.; HAMED, Ahmed M. M.; BORG, Ruben Paul. Effect of fine clay brick waste on the properties of self compacting concrete. **Alexandria Engineering Journal**, Líbia, p. 1-7, mar. 2016.

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.

MARTINS, David J.; CORREIA, João R.; BRITO, Jorge de. The effect of high temperature on the residual mechanical performance of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates. **Fire and Materials**, Portugal, v. 40, n. 2, p. 289-304, nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2287>.

MATHEWS, M. E.; ANAND, N.; LUBLÓY, E; KIRAN, T. Effect of elevated temperature on interfacial shear transfer capacity of self-compacting concrete. **Case Studies in Construction Materials**, Índia, v. 15, p. 1-16, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00753>.

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**, Índia, v. 198, p. 120-132, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.155>.

MANSOOR, Junaid; SHAH, Syeed Adnan Raheel; KHAN, Mudasser Muneer; SADIQ, Abdullah Naveed; ANWAR, Muhammad Kashif; SIDDIQ, Muhammad Usman; AHMAD, Hassam. Analysis of Mechanical Properties of Self Compacted Concrete by Partial Replacement of Cement with Industrial Wastes under Elevated Temperature. **Applied Sciences**, Paquistão, v. 8, n. 3. p. 1-20, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8030364>.

MEENA, Ram Vilas; BENIWAL, Ankit Singh; JAIN, Abhishek; CHOUDHARY, Rakesh; MANDOLIA, Ramswaroop. Evaluating resistance of ceramic waste tile self-compacting concrete to sulphuric acid attack. **Construction and Building Materials**, Índia, v. 393, p. 1-10, ago. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132042>.

MEILLYTA, Meillyta; WAHYUNI, Wahyuni; FAHMI, Zul. Mechanical Behaviour of Self-Compacting Concrete Using Ceramic Waste. **World Sustainable Construction Conference Series**, Indonésia, v. 1140, p. 1-8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1140/1/012024>.

MOHAMMADYAN-YASOUJ, Seyed Esmaeil; HEIDARI, Nastaran; SHOKRAVI, Hoofar. Influence of waste alumina powder on self-compacting concrete resistance under elevated temperature. **Journal of Building Engineering**, Irã, v. 41, p. 1-13, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102360>.

MUJEDU, Kasali Adebayo; AB-KADIR, Mariyana Aida; SARBINI, Noor Nabilah; ISMAIL, Mohammad. Microstructure and compressive strength of self-compacting concrete incorporating palm oil fuel ash exposed to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, Malásia, v. 274, p. 122025-122035, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122025>.

NACERI, Abdelghani; HAMINA, Makhlofí Chikouche. Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. **Waste Management**, Argélia, v. 29, n. 8, p. 2378-2384, ago. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.026>.

NASR, Mohammed Salah; SALMAN, Awham Jumah; GHAYYIB, Rusul Jaber; SHUBBAR, Ali; AL-MAMOORI, Shahad; AL-KHAFAJI, Zainab; HASHIM, Tameem Mohammed; HASAN, Zaid Ali; SADIQUE, Monower. Effect of Clay Brick Waste Powder on the Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete: State-of-the-Art and Life Cycle Assessment. **Energies**, Iraque, v. 16, n. 12, p. 1-23, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16124587>.

NEMATZADEH, Mahdi; BARADARAN-NASIRI, Ardan. Residual Properties of Concrete Containing Recycled Refractory Brick Aggregate at Elevated Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Irã, v. 30, n. 1, p. 1-13, jan. 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002125).

NEPOMUCENO, Miguel C. S.; ISIDORO, Rui A. S.; CATARINO, José P. G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction And Building Materials**, Portugal, v. 165, p. 284-294, mar. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.052>.

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.

NURUDDIN, Muhd Fadhil; AZMEE, Norzaireen Mohd; YUNG, Chang Kok. Effect of fire flame exposure on ductile self-compacting concrete (DSCC) blended with MIRHA and fly ash. **Construction And Building Materials**, Malásia, v. 50, p. 388-393, jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.038>.

NURUZZAMAN, Md.; MAJHI, S.; SARKER, P. K.; MUKHERJEE, A. Microstructure and residual properties of raw and ground ferronickel slag incorporated self-compacting concrete exposed to elevated temperatures. **Construction And Building Materials**, Austrália, v. 362, p. 1-14, jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129707>.

OGRODNIK, Paweł; ZEGARDŁO, Bartosz; HALICKA, Anna. Preliminary assessment of utilization of sanitary ceramics wastes as an aggregate in concrete working at the high temperature. **Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza**, Polônia, v. 1, p. 49-56, 2012.

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. Effects of elevated temperatures on properties of self-compacting-concrete containing fly ash and spent foundry sand. **Construction and Building Materials**. Punjab, v. 34, p. 512-521. set. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.026>.

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, Bertil. Fire resistance of self-compacting concrete, SCC. **Materials And Structures**, Lund, v. 37, p. 575-584. nov. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02483286>.

PINEAUD, A.; PIMIENTA, P.; RÉMOND, S.; CARRÉ, H. Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. **Construction and Building Materials**, França, v. 122, p. 747-755, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.132>.

PRAYUDA, Hakas; MONIKA, Fanny; CAHYATI, Martyana Dwi. Fresh properties and compressive strength of self compacting concrete with fines aggregate replacement using red brick powder and rice husk ash. **World Journal of Engineering**, Indonésia, v. 17, n. 4, p. 473-480, jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/WJE-08-2019-0236>.

RAJAWAT, Deepak; SIDDIQUE, Salman; SHRIVASTAVA, Sandeep; CHAUDHARY, Sandeep; GUPTA, Trilok. Influence of fine ceramic aggregates on the residual properties of concrete subjected to elevated temperature. **Fire and Materials**, Índia, v. 42, n. 7, p. 834-842, maio 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2639>.

RAO, U. V. N.; KUMAR, N. V. S. Greener and sustainable self-compaction concrete: A review on performance at elevated temperatures. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, Índia, v. 1130, p. 1–12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1130/1/012011>.

RAY, Sourav; HAQUE, Mohaiminul; SAKIB, Md. Nazmus; MITA, Ayesha Ferdous; RAHMAN, M. D. Masnun; TANMOY, Bibhas B. Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review. **Journal of Building Engineering**, Bangladesh, v. 43, p. 1–27, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102567>.

REDDY, D. Harinadha; RAMASWAMY, Ananth. Influence of mineral admixtures and aggregates on properties of different concretes under high temperature conditions I: Experimental study. **Journal of Building Engineering**, Índia, v. 14, p. 103–114, nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.09.013>.

REINHARDT, Hans-Wolf; STEGMAIER, Michael. Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of self-compacting concrete (SCC). **Cement and Concrete Research**, Alemanha, v. 36, n. 5, p. 879-885, maio 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.004>.

RILEM Technical Committee. **RILEM TC 129-MHT**: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. 2004.

RILEM Technical Committee. **RILEM TC 200-HTC**: Mechanical concrete properties at high temperatures. 2007.

ROHDEN, Abrahão Bernardo; CAMILO, Jéssica Regina; AMARAL, Rafaela Cristina; GARCEZ, Estela Oliari; GARCEZ, Mônica Regina. Effects of Plastic Waste on the Heat-Induced Spalling Performance and Mechanical Properties of High Strength Concrete. **Materials**, Blumenau, v. 13, n. 15, p. 1-17, jul. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13153262>.

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, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

SANTOS, Iago Lopes dos. **Uso de Finos de Resíduos de Construção e Demolição em Concreto Autoadensável**. 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SARHAT, Salah R.; SHERWOOD, Edward G. Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Ottawa, v. 25, n. 11, p. 1721-1730. nov. 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000719](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000719).

SCREENING EAGLE TECHNOLOGIES. Pundit Ultrasonic Instruments: global summit 2017. Global Summit 2017. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=CJQ\\_d8bhmik](https://www.youtube.com/watch?v=CJQ_d8bhmik). Acesso em: 24 fev. 2023.

SESHU, D. Rama; PRATUSHA, A. Study on compressive strength behaviour of normal concrete and self-compacting concrete subjected to elevated temperatures. **Magazine of Concrete Research**, Índia, v. 65, n. 7, p. 415-421, abr. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/mac.12.00108>.

SHAH, Mati Ullah; USMAN, Muhammad; HANIF, Muhammad Usman; NASEEM, Iqra; FAROOQ, Sara. Utilization of Solid Waste from Brick Industry and Hydrated Lime in Self-Compacting Cement Pastes. **Materials**, Paquistão, v. 14, n. 5, p. 1-22, fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051109>.

SHAH, Syeed Adnan Raheel; AHMAD, Hassam; ALHAZMI, Hatem; ANWAR, Muhammad Kashif; IQBAL, Fahad. Utilization of Self-Consolidated Green Material for Sustainable Development: An Environment Friendly Waste Materials Application for Circular Economy. **Polymers**, Paquistão, v. 13, n. 17, p. 1-13, set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13172985>.

SI-AHMED, Mohammed; KENAI, Said. Behavior of Self-compacting Mortars Based on Waste Brick Powder. **Current Materials Science**, Argélia, v. 13, n. 1, p. 39-44, 2020. DOI: <https://doi.org/10.2174/2666145413666200219091459>.

SIDERIS, Kosmas K. Mechanical Characteristics of Self-Consolidating Concretes Exposed to Elevated Temperatures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, Grécia, v. 19, n. 8, p. 648-654, ago. 2007. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(648\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(648)).

SILVA, R.V.; BRITO, J. de; DHIR, R.K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, Lisboa, v. 65, p. 201-217, ago. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.

SILVA, Yimmy Fernando; DELVASTO, Silvio; IZQUIERDO, Silvia; ARAYA-LETELIER, Gerardo. Short and long-term physical and mechanical characterization of self-compacting concrete made with masonry and concrete residue. **Construction and Building Materials**, Colômbia, v. 312, p. 1-11, dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125382>.

SILVA, Yimmy Fernando; LANGE, David A.; DELVASTO, Silvio. Effect of incorporation of masonry residue on the properties of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, Colômbia, v. 196, p. 277-283, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.132>.

SINAPI: Referências para Custos Horários e Encargos: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil - Caixa Econômica Federal, jun. 2023. Brasília: CAIXA, 2023.

SOLOMON, A. A.; MATHEWS, M. E.; ANAND, N; KIRAN, T; JAYAKUMAR, G.; YADAV, B. S. K; SUDHEER, G. Effect of elevated temperature on Stress-Strain behaviour of Self-Compacting concrete. **Materials Today: Proceedings**, Índia, v. 49, n. 5, p. 1786-1792, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.018>.

SUBAŞI, Serkan; ÖZTÜRK, Hakan; EMIROĞLU, Mehmet. Utilizing of waste ceramic powders as filler material in self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 567-574, set. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.180>.

SUN, Chang; CHEN, Qiuyi; XIAO, Jianzhuang; LIU, Weidong. Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. **Resources, Conservation & Recycling**, Shanghai, v. 161, p. 1-12, out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104930>.

SUN, Renjuan; HUANG, Dawei; GE, Zhi; HU, Yizhang; GUAN, Yanhua. Properties of self-consolidating concrete with recycled clay-brick-powder replacing cementitious material. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, China, v. 3, n. 3-4, p. 211-219, dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/21650373.2014.946542>.

SOUZA, Luiz Ailton de Araújo. **Comportamento do Concreto Frente à Condição de Altas Temperaturas: Análise das Propriedades Mecânicas Residuais**. 2014. 150 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

TAN, Jiawei; CAI, Jingming; LI, Xiaopeng; PAN, Jinlong; LI, Jiabin. Development of eco-friendly geopolymers with ground mixed recycled aggregates and slag. **Journal of Cleaner Production**, China, v. 256, p. 1-12, maio 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120369>.

TAO, Jin; LIU, Xian; YUAN, Yong; TAERWE, Luc. Transient strain of self-compacting concrete loaded in compression heated to 700 °C. **Materials and Structures**, China, v. 46, p. 191-201, jan. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9894-2>.

TAO, Jin; YUAN, Yong; TAERWE, Luc. Compressive Strength of Self-Compacting Concrete during High-Temperature Exposure. **Journal of Materials in Civil Engineering**, China, v. 22, n. 10, p. 1005-1011. out. 2010. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000102](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000102).

TAO, Jin; YUAN, Yong; TAERWE, Luc. Thermal stress–strain of self-compacting concrete in compression. **Fire and Materials**, China, v. 37, p. 187-199, abr. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.2124>.

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

UYSAL, Mucteba. Self-compacting concrete incorporating filler additives: performance at high temperatures. **Construction and Building Materials**, Turquia, v. 26, n. 1, p. 701-706, jan. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.077>.

VIEIRA, J. P. B; CORREIA, J. R.; BRITO, J de. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. **Cement And Concrete Research**, Lisboa, v. 41, n. 5, p. 533-541. maio 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.002>.

VOTORANTIM, Cimento. SAC Votorantim Cimentos Solicitação Número: 3417178 - Solicitações de Documentos [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por: <anajulia.gouveia@gmail.com> em: 21 set. 2023.

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.

WU, Huixia; XIAO, Jianzhuang; LIANG, Chaofeng, MA, Zhiming. Properties of Cementitious Materials with Recycled Aggregate and Powder Both from Clay Brick Waste. **Buildings**, China, v. 11, n. 3, p. 1-23, mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11030119>.

YU, Ke-Quan; ZHU, Wen-Jun; DING, Yao; LU, Zhou-Dao; YU, Jiang-tao; XIAO, Jian-Zhuang. Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP). **Cement and Concrete Research**, China, v. 124, p. 1-19, out. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105813>.

ZEGARDŁO, Bartosz; SZELAG, Maciej; OGRODNIK, Paweł. Concrete resistant to spalling made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes – The effect of moisture and porosity on destructive processes occurring in fire conditions. **Construction and Building Materials**, Polônia, v. 173, p. 58-68, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.030>.

ZHANG, Hongzhi; YUAN, Huaqiang; GE, Zhi; WU, Jiajie; FANG, Chen; SCHLANGEN, Erik; SAVIJA, Branko. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing recycled fine clay brick aggregates. **Materials and Structures**, China, v. 54, n. 159, p. 1-13, jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01751-5>.

ZHAO, Yasong; GAO, Jianming; LIU, Chuanbei; CHEN, Xuemei; XU, Zhenhai. The particle-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. **Journal of Cleaner Production**, China, v. 242, p. 1-10, jan. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118521>.

ZHAO, Zengfeng; GRELLIER, Adèle; BOUARROUDJ, Mohamed El Karim; MICHEL, Frédéric; BULTEEL, David; COURARD, Luc. Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability. **Journal of Building Engineering**, Bélgica, v. 43, p. 1-11, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102898>.

ZHENG, Chaocan; LOU, Cong; DU, Geng; LI, Xiaozhen; LIU, Zhiwu; LI, Liqin. Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate. **Results In Physics**, Zhejiang, v. 9, p. 1317-1322, jun. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.04.061>.

ZHU, Wenzhong; BARTOS, Peter J. M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Escócia, v. 33, n. 6, p. 921-926, jun. 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01090-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01090-6).

**APÊNDICE A – Resultados dos ensaios de composição granulométrica para o  
RCV**

## A1 RCV peneirado

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	0	0
# 1,18	0	0
# 0,60	0	0
# 0,30	41	41
# 0,15	23	63
Fundo	37	100
Módulo de Finura		1,04
Dimensão Máxima Característica		0,6 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

## A2 RCV moído por 1h

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	3	3
# 1,18	11	15
# 0,60	24	38
# 0,30	18	57
# 0,15	21	78
Fundo	22	100
Módulo de Finura		1,92
Dimensão Máxima Característica		2,36 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

## A3 RCV moído por 1h e peneirada

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	0	0
# 1,18	0	0
# 0,60	0	0
# 0,30	27	27
# 0,15	31	57
Fundo	43	100
Módulo de Finura		0,84
Dimensão Máxima Característica		0,6 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

## A4 RCV moído por 2h

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	0	0
# 1,18	0	0
# 0,60	9	9
# 0,30	69	79
# 0,15	16	95
Fundo	5	100
Módulo de Finura		1,84
Dimensão Máxima Característica		1,18 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

## A5 RCV moído por 2h e peneirada

Abertura da Peneira (mm)	% Retida Média	% Retida Acumulada
# 9,5	0	0
# 4,75	0	0
# 2,36	0	0
# 1,18	0	0
# 0,60	0	0
# 0,30	1	1
# 0,15	36	37
Fundo	63	100
Módulo de Finura		0,38
Dimensão Máxima Característica		0,3 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

## **APÊNDICE B – Regressão das curvas de dosagem**

## B1 Regressão para o CC

**CURVA DE ABRAMS – 3 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(fc3)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
1		0,45	30,80	1,48855	0,20250	2,21578	0,66985
2		0,59	25,89	1,41305	0,34810	1,99671	0,83370
3		0,76	16,69	1,22246	0,57760	1,49440	0,92907
SOMATÓRIOS		1,80	73,38	4,12406	1,12820	5,70689	2,43261
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,86764
	Sy'y'=	0,03761		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			1,89527
	Sxy'=	-0,04182		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,03642
	SQR=	0,00133		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=			0,10172
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,16587
	A=	78,57184		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,98221
	B=	7,37287		r <sup>2</sup> =			0,96474
				$f_{c3} = \frac{78,5718}{7,3729^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,9647			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 7 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(fc7)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
1		0,45	35,46	1,54968	0,20250	2,40150	0,69735
2		0,59	26,77	1,42757	0,34810	2,03795	0,84226
3		0,76	19,00	1,27864	0,57760	1,63492	0,97177
SOMATÓRIOS		1,80	81,22	4,25588	1,12820	6,07437	2,51139
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,87438
	Sy'y'=	0,03685		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			1,94325
	Sxy'=	-0,04215		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,00024
	SQR=	0,00000006		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=			0,00067
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,00109
	A=	87,75152		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,999999
	B=	7,48821		r <sup>2</sup> =			0,999998
				$f_{c7} = \frac{87,7515}{7,4882^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 1,0000			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 28 dias**

Pontos	3	Dados			Regressão		
		x(a/c)	y(fc <sub>28</sub> )	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	41,21	1,61500	0,20250	2,60823	0,72675
	2	0,59	29,84	1,47473	0,34810	2,17482	0,87009
	3	0,76	25,27	1,40261	0,57760	1,96730	1,06598
SOMATÓRIOS		1,80	96,32	4,49233	1,12820	6,75035	2,66282
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,67595
	Sy'y'=	0,02333		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			1,90301
	Sxy'=	-0,03258		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,03616
	SQR=	0,00131		Sa=((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> .Se=			0,10100
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,16470
	A=	79,98618		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,97157
	B=	4,74188		r <sup>2</sup> =			0,94396
				$f_{c\ 28} = \frac{79,9862}{4,7419^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,9440			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 63 dias**

Pontos	3	Dados			Regressão		
		x(a/c)	y(fc <sub>63</sub> )	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	41,14	1,61426	0,20250	2,60585	0,72642
	2	0,59	34,37	1,53618	0,34810	2,35985	0,90635
	3	0,76	24,24	1,38453	0,57760	1,91693	1,05224
SOMATÓRIOS		1,80	99,75	4,53498	1,12820	6,88263	2,68501
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,74639
	Sy'y'=	0,02729		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			1,95950
	Sxy'=	-0,03598		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,02092
	SQR=	0,00044		Sa=((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> .Se=			0,05844
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,09530
	A=	91,09522		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,99195
	B=	5,57692		r <sup>2</sup> =			0,98396
				$f_{c\ 63} = \frac{91,0952}{5,5769^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,9840			

Fonte: elaborado pelo autor.

## B2 Regressão para o CAA

**CURVA DE ABRAMS – 3 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(fc3)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
1		0,45	35,86	1,55455	0,20250	2,41662	0,69955
2		0,59	29,31	1,46694	0,34810	2,15192	0,86550
3		0,76	18,52	1,26752	0,57760	1,60662	0,96332
SOMATÓRIOS		1,80	83,68	4,28902	1,12820	6,17516	2,52836
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,93461
	Sy'y'=	0,04328		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			1,99044
	Sxy'=	-0,04505		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,03425
	SQR=	0,00117		Sa=((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> .Se=			0,09568
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,15602
	A=	97,82193		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,98635
	B=	8,60216		r <sup>2</sup> =			0,97289
				$f_{c3} = \frac{97,8219}{8,6022^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,9729			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 7 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(fc7)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
1		0,45	40,99	1,61262	0,20250	2,60056	0,72568
2		0,59	32,10	1,50644	0,34810	2,26935	0,88880
3		0,76	20,07	1,30255	0,57760	1,69663	0,98994
SOMATÓRIOS		1,80	93,15	4,42161	1,12820	6,56654	2,60442
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-1,00727
	Sy'y'=	0,04967		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			2,07823
	Sxy'=	-0,04855		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,02759
	SQR=	0,00076		Sa=((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> .Se=			0,07707
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,12568
	A=	119,73839		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,99231
	B=	10,16887		r <sup>2</sup> =			0,98467
				$f_{c7} = \frac{119,7384}{10,1689^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,9847			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 28 dias**

Pontos	3	Dados			Regressão		
		x(a/c)	y(fc <sub>28</sub> )	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	44,05	1,64395	0,20250	2,70256	0,73978
	2	0,59	40,93	1,61199	0,34810	2,59851	0,95107
	3	0,76	24,46	1,38837	0,57760	1,92756	1,05516
SOMATÓRIOS		1,80	109,43	4,64430	1,12820	7,22863	2,74601
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,84176
	Sy'y'=	0,03878		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			2,05316
	Sxy'=	-0,04057		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,06804
	SQR=	0,00463		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=			0,19006
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,30993
	A=	113,02075		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,93841
	B=	6,94644		r <sup>2</sup> =			0,88062
				$f_{c\ 28} = \frac{113,0208}{6,9464^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,8806			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 63 dias**

Pontos	3	Dados			Regressão		
		x(a/c)	y(fc <sub>63</sub> )	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	47,52	1,67688	0,20250	2,81191	0,75459
	2	0,59	44,13	1,64473	0,34810	2,70515	0,97039
	3	0,76	26,08	1,41631	0,57760	2,00593	1,07639
SOMATÓRIOS		1,80	117,73	4,73792	1,12820	7,52299	2,80138
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-0,85829
	Sy'y'=	0,04037		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			2,09428
	Sxy'=	-0,04137		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,06973
	SQR=	0,00486		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=			0,19477
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,31761
	A=	124,24535		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,93785
	B=	7,21590		r <sup>2</sup> =			0,87956
				$f_{c\ 63} = \frac{124,2454}{7,2159^{a/c}}$			
				r <sup>2</sup> = 0,8796			

Fonte: elaborado pelo autor.

## B3 Regressão para o CAA-RCV

**CURVA DE ABRAMS – 3 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(fc3)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	39,93	1,60130	0,20250	2,56416	0,72058
	2	0,59	27,81	1,44420	0,34810	2,08572	0,85208
	3	0,76	18,01	1,25551	0,57760	1,57631	0,95419
SOMATÓRIOS		1,80	85,75	4,30101	1,12820	6,22619	2,52685
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-1,11524
	Sy'y'=	0,05995		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			2,10282
	Sxy'=	-0,05375		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,00076
	SQR=	0,00000		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=			0,00213
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,00348
	A=	126,71182		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-1,00000
	B=	13,03896		r <sup>2</sup> =			0,99999
				$f_{c3} = \frac{126,7118}{13,0390^{a/c}}$			
				$r^2 = 1,0000$			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 7 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(fc7)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	44,02	1,64365	0,20250	2,70159	0,73964
	2	0,59	31,07	1,49234	0,34810	2,22708	0,88048
	3	0,76	19,22	1,28375	0,57760	1,64802	0,97565
SOMATÓRIOS		1,80	94,31	4,41974	1,12820	6,57669	2,59578
	Sxx=	0,04820		b'=Sxy'/Sxx=			-1,16329
	Sy'y'=	0,06531		a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=			2,17122
	Sxy'=	-0,05607		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			0,00915
	SQR=	0,00008		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=			0,02556
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			0,04168
	A=	148,32683		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			-0,99936
	B=	14,56417		r <sup>2</sup> =			0,99872
				$f_{c7} = \frac{148,3268}{14,5642^{a/c}}$			
				$r^2 = 0,9987$			

Fonte: elaborado pelo autor.

**CURVA DE ABRAMS – 28 dias**

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(f <sub>C28</sub> )	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	60,78	1,78376	0,20250	3,18180	0,80269
	2	0,59	38,48	1,58524	0,34810	2,51297	0,93529
	3	0,76	26,47	1,42275	0,57760	2,02423	1,08129
SOMATÓRIOS		1,80	125,73	4,79175	1,12820	7,71900	2,81927
	Sxx=	0,04820	b'=Sxy'/Sxx=				-1,15717
	Sy'y'=	0,06538	a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=				2,29155
	Sxy'=	-0,05578	Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =				0,02893
	SQR=	0,00084	Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=				0,08082
			Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>				0,13178
	A=	195,68375	r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>				-0,99358
	B=	14,36067	r <sup>2</sup> =				0,98720
			$f_{C\ 28} = \frac{195,6838}{14,3607^{a/c}}$				
			r <sup>2</sup> = 0,9872				

Fonte: elaborado pelo autor.

#### CURVA DE ABRAMS – 63 dias

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(a/c)	y(f <sub>C63</sub> )	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	0,45	60,74	1,78347	0,20250	3,18078	0,80256
	2	0,59	40,83	1,61098	0,34810	2,59525	0,95048
	3	0,76	27,98	1,44685	0,57760	2,09337	1,09960
SOMATÓRIOS		1,80	129,55	4,84130	1,12820	7,86941	2,85265
	Sxx=	0,04820	b'=Sxy'/Sxx=				-1,08165
	Sy'y'=	0,05667	a'=(soma y'/n)-b'.(soma x/n)=				2,26276
	Sxy'=	-0,05214	Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =				0,01669
	SQR=	0,00028	Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=				0,04661
			Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>				0,07601
	A=	183,12827	r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>				-0,99754
	B=	12,06832	r <sup>2</sup> =				0,99509
			$f_{C\ 63} = \frac{183,1283}{12,0683^{a/c}}$				
			r <sup>2</sup> = 0,9951				

Fonte: elaborado pelo autor.

## B4 Lei de Lyse para todas as famílias de concretos

Pontos	3	Dados		Regressão		
		x(a/c)	y(m)	x <sup>2</sup>	y <sup>2</sup>	x.y
	1	0,45	3,50	0,2025	12,2500	1,5750
	2	0,59	5,00	0,3481	25,0000	2,9500
	3	0,76	6,50	0,5776	42,2500	4,9400
SOMATÓRIOS		1,80	15,00	1,12820	79,50000	9,46500
	Sxx=	0,04820		b=Sxy/Sxx=		9,64730
	Syy=	4,50000		a=(soma y/n)-b.(soma x/n)=		-0,78838
	Sxy=	0,46500		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =		0,11834
	SQR=	0,01400		Sa=(((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> ).Se=		0,33055
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>		0,53902
	A=	-0,78838		r=Sxy/(Sxx.Syy) <sup>0,5</sup>		0,99844
	B=	9,64730		r <sup>2</sup> =		0,99689
				m = -0,7884+9,6473*a/c		
				r <sup>2</sup> = 0,9969		

Fonte: elaborado pelo autor.

## B5 Lei de Molinari para os concretos convencionais

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(m)	y(C)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	6,50	297,62	0,0034	42,250	1,129E-05	0,0218
	2	5,00	397,41	0,0025	25,000	6,332E-06	0,0126
	3	3,50	496,03	0,0020	12,250	4,064E-06	0,0071
SOMATÓRIOS		15,00	1191,06	0,0079	79,500	2,169E-05	0,0415
	Sxx=	4,5000		b'=Sxy'/Sxx=			4,480E-04
	Sy'y'=	9,228E-07		a'=(soma y'/n)-b'*(soma x/n)=			3,908E-04
	Sxy'=	2,016E-03		Se=(SQR/(n-2)) <sup>0,5</sup> =			1,402E-04
	SQR=	1,966E-09		Sa=((soma x <sup>2</sup> )/(n.Sxx)) <sup>0,5</sup> .Se=			3,402E-04
				Sb=Se/(Sxx) <sup>0,5</sup>			6,609E-05
	A=	0,39079		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y') <sup>0,5</sup>			0,98929
	B=	0,44799		r <sup>2</sup> =			0,97870
				$C = \frac{1000}{0,3908 + 0,4480 * m}$			
				$r^2 = 0,9787$			

Fonte: elaborado pelo autor.

## B6 Lei de Molinari para o CAA

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(m)	y(C)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	6,50	300,73	0,0033	42,2500	1,106E-05	0,0216
	2	5,00	401,77	0,0025	25,0000	6,195E-06	0,0124
	3	3,50	496,95	0,0020	12,2500	4,049E-06	0,0070
SOMATÓRIOS		15,00	1199,45	0,0078	79,5000	2,130E-05	0,0411
	Sxx=	4,5000		b'=Sxy'/Sxx=			4,377E-04
	Sy'y'=	8,835E-07		a'=(soma y'/n)-b'*(soma x/n)=			4,206E-04
	Sxy'=	1,969E-03		Se=(SQR/(n-2))^0,5=			1,468E-04
	SQR=	2,155E-08		Sa=(((soma x^2)/(n.Sxx))^0,5).Se=			3,562E-04
				Sb=Se/(Sxx)^0,5			6,919E-05
	A=	0,42056		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y')^0,5			0,98773
	B=	0,43766		r <sup>2</sup> =			0,97561
				$C = \frac{1000}{0,4206 + 0,4377 * m}$			
				$r^2 = 0,9756$			

Fonte: elaborado pelo autor.

## B7 Lei de Molinari para o CAA-RCV

Pontos	3	Dados		Regressão			
		x(m)	y(C)	y'	x <sup>2</sup>	y' <sup>2</sup>	x.y'
	1	6,50	300,73	0,0033	42,2500	1,106E-05	0,0216
	2	5,00	400,75	0,0025	25,0000	6,227E-06	0,0125
	3	3,50	496,46	0,0020	12,2500	4,057E-06	0,0070
SOMATÓRIOS		15,00	1197,94	0,0078	79,5000	2,134E-05	0,0411
	Sxx=	4,5000		b'=Sxy'/Sxx=			4,370E-04
	Sy'y'=	8,796E-07		a'=(soma y'/n)-b'*(soma x/n)=			4,266E-04
	Sxy'=	1,966E-03		Se=(SQR/(n-2))^0,5=			1,424E-04
	SQR=	2,028E-08		Sa=(((soma x^2)/(n.Sxx))^0,5).Se=			3,456E-04
				Sb=Se/(Sxx)^0,5			6,714E-05
	A=	0,42664		r=Sxy'/(Sxx.Sy'y')^0,5			0,98840
	B=	0,43699		r <sup>2</sup> =			0,97694
				$C = \frac{1000}{0,4266 + 0,4370 * m}$			
				$r^2 = 0,9769$			

Fonte: elaborado pelo autor.

## **APÊNDICE C – Massa dos corpos de prova no estado endurecido**

## C1 Massa em quilogramas do CC

CP	3	7	14	21	28	35	42	49	56	63
01	3,6785	3,6800	3,6435	3,6388	3,6340	3,6270	3,6200	3,6150	-	3,6085
02	3,7530	3,7560	3,7215	3,7170	3,7125	3,7055	3,6995	3,6945	-	3,6880
03	3,6690	3,6715	3,6355	3,6308	3,6260	3,6185	3,6120	3,6070	-	3,6000
04	3,7265	3,7270	3,6930	3,6880	3,6830	3,6760	3,6695	3,6640	-	3,6575
05	3,7230	3,7245	3,6910	3,6863	3,6815	3,6745	3,6680	3,6630	-	3,6565
06	3,7045	3,7065	3,6695	3,6648	3,6600	3,6530	3,6465	3,6415	-	3,6345
07	3,6980	3,6975	3,6615	3,6568	3,6520	3,6445	3,6380	3,6330	-	3,6260
08	3,6365	3,6370	3,6005	3,5953	3,5900	3,5830	3,5765	3,5710	-	3,5640
09	3,7250	3,7270	3,6915	3,6863	3,6810	3,6740	3,6675	3,6620	-	3,6555
10	3,7200	3,7210	3,6845	3,6795	3,6745	3,6675	3,6610	3,6555	-	3,6490
11	3,6825	3,6840	3,6470	3,6420	3,6370	3,6300	3,6230	3,6175	-	3,6105
12	3,7155	3,7165	3,6800	3,6753	3,6705	3,6635	3,6570	3,6520	-	3,6450
13	3,7435	3,7435	3,7065	3,7035	3,6965	3,6895	3,6830	3,6780	-	3,6700
14	3,6585	3,6600	3,6210	3,6180	3,6110	3,6040	3,5970	3,5920	-	3,5850
15	3,7132	3,7170	3,6785	3,6755	3,6690	3,6615	3,6555	3,6505	-	3,6435
16	3,7270	3,7320	3,6920	3,6895	3,6825	3,6755	3,6690	3,6635	-	3,6565
17	3,7300	3,7350	3,6970	3,6945	3,6875	3,6805	3,6740	3,6690	-	3,6625
18	3,7350	3,7380	3,6995	3,6970	3,6895	3,6825	3,6760	3,6700	-	3,6635
19	3,7230	3,7250	3,6900	3,6875	3,6805	3,6740	3,6675	3,6625	-	3,6565
20	3,7070	3,7080	3,6710	3,6685	3,6610	3,6540	3,6470	3,6415	-	3,6340
21	3,7085	3,7105	3,6735	3,6710	3,6640	3,6570	3,6505	3,6450	-	3,6385
22	3,6965	3,6965	3,6610	3,6580	3,6515	3,6445	3,6385	3,6330	-	3,6270
23	3,7175	3,7185	3,6835	3,6800	3,6735	3,6660	3,6590	3,6540	-	3,6470
24	3,6615	3,6625	3,6255	3,6225	3,6150	3,6080	3,6015	3,5965	-	3,5895
25	3,6285	3,6290	3,5910	3,5880	3,5805	3,5735	3,5665	3,5610	-	3,5545
26	3,6840	3,6850	3,6475	3,6440	3,6365	3,6295	3,6225	3,6175	-	3,6105
27	3,7275	3,7305	3,6910	3,6880	3,6800	3,6730	3,6660	3,6605	-	3,6535
28	3,6890	3,6895	3,6545	3,6520	3,6450	3,6380	3,6320	3,6265	-	3,6205
29	3,5530	3,5530	3,5180	3,5155	3,5080	3,5015	3,4955	3,4905	-	3,4840
30	3,6760	3,6795	3,6410	3,6380	3,6310	3,6240	3,6175	3,6120	-	3,6060

Fonte: elaborado pelo autor.

## C2 Massa em quilogramas do CAA

CP	3	7	14	21	28	35	42	49	56	63
01	3,6735	3,6760	3,6425	3,6290	3,6200	-	3,6095	3,6045	3,6010	3,5980
02	3,6170	3,6200	3,5875	3,5725	3,5625	-	3,5515	3,5460	3,5415	3,5390
03	3,6865	3,6895	3,6565	3,6420	3,6325	-	3,6220	3,6170	3,6130	3,6100
04	3,5890	3,5915	3,5580	3,5445	3,5345	-	3,5235	3,5185	3,5140	3,5115
05	3,6515	3,6540	3,6200	3,6060	3,5960	-	3,5855	3,5800	3,5760	3,5735
06	3,7075	3,7100	3,6775	3,6635	3,6545	-	3,6440	3,6385	3,6350	3,6325
07	3,6140	3,6145	3,5815	3,5670	3,5575	-	3,5470	3,5420	3,5375	3,5350
08	3,6170	3,6180	3,5865	3,5725	3,5630	-	3,5520	3,5470	3,5430	3,5405
09	3,6585	3,6585	3,6275	3,6140	3,6040	-	3,5940	3,5890	3,5855	3,5830
10	3,6475	3,6480	3,6160	3,6015	3,5920	-	3,5810	3,5755	3,5715	3,5690
11	3,6215	3,6235	3,5925	3,5785	3,5690	-	3,5580	3,5530	3,5490	3,5465
12	3,6325	3,6350	3,6025	3,5890	3,5790	-	3,5680	3,5635	3,5590	3,5570
13	3,6635	3,6645	3,6325	3,6180	3,6085	-	3,5980	3,5930	3,5890	3,5865
14	3,6450	3,6460	3,6140	3,5995	3,5900	-	3,5790	3,5740	3,5695	3,5670
15	3,6340	3,6355	3,6025	3,5875	3,5775	-	3,5665	3,5615	3,5575	3,5550
16	3,6145	3,6165	3,5830	3,5685	3,5595	-	3,5490	3,5440	3,5400	3,5375
17	3,5875	3,5885	3,5560	3,5415	3,5325	-	3,5215	3,5170	3,5125	3,5100
18	3,6735	3,6735	3,6410	3,6275	3,6190	-	3,6085	3,6035	3,6000	3,5975
19	3,6815	3,6835	3,6515	3,6370	3,6280	-	3,6170	3,6125	3,6085	3,6055
20	3,5550	3,5575	3,5240	3,5090	3,4995	-	3,4885	3,4835	3,4790	3,4760
21	3,5650	3,5650	3,5325	3,5190	3,5100	-	3,5005	3,4955	3,4910	3,4895
22	3,4980	3,4975	3,4655	3,4520	3,4425	-	3,4320	3,4275	3,4235	3,4205
23	3,6760	3,6770	3,6455	3,6310	3,6215	-	3,6105	3,6055	3,6015	3,5990
24	3,6330	3,6345	3,6000	3,5860	3,5760	-	3,5655	3,5605	3,5560	3,5535
25	3,6170	3,6190	3,5880	3,5735	3,5640	-	3,5535	3,5485	3,5450	3,5420
26	3,6945	3,6960	3,6635	3,6490	3,6400	-	3,6290	3,6235	3,6200	3,6175
27	3,6725	3,6750	3,6420	3,6275	3,6180	-	3,6065	3,6015	3,5975	3,5950
28	3,4875	3,4900	3,4590	3,4460	3,4375	-	3,4275	3,4235	3,4195	3,4170
29	3,6360	3,6345	3,6015	3,5875	3,5780	-	3,5670	3,5620	3,5580	3,5550
30	3,6525	3,6505	3,6205	3,6060	3,5970	-	3,5865	3,5815	3,5780	3,5755

Fonte: elaborado pelo autor.

### C3 Massa em quilogramas do CAA-RCV

CP	3	7	14	21	28	35	42	49	56	63
01	3,5945	3,5915	3,5495	3,5440	3,5360	3,5300	3,5245	3,5210	3,5170	3,5155
02	3,6375	3,6545	3,6115	3,6055	3,5975	3,5915	3,5855	3,5820	3,5775	3,5760
03	3,6960	3,6940	3,6515	3,6460	3,6380	3,6320	3,6260	3,6220	3,6180	3,6160
04	3,5970	3,5940	3,5490	3,5425	3,5345	3,5285	3,5215	3,5180	3,5140	3,5125
05	3,7360	3,7330	3,6885	3,6825	3,6740	3,6680	3,6620	3,6580	3,6540	3,6520
06	3,6275	3,6245	3,5820	3,5755	3,5680	3,5615	3,5560	3,5520	3,5480	3,5460
07	3,6995	3,6965	3,6550	3,6490	3,6410	3,6350	3,6290	3,6250	3,6210	3,6190
08	3,7170	3,7130	3,6725	3,6670	3,6595	3,6535	3,4750	3,6440	3,6400	3,6385
09	3,7540	3,7505	3,7070	3,7005	3,6930	3,6865	3,6805	3,6770	3,6725	3,6710
10	3,6450	3,6415	3,5985	3,5925	3,5840	3,5780	3,5715	3,5680	3,5635	3,5620
11	3,6825	3,6800	3,6355	3,6295	3,6210	3,6145	3,6085	3,6040	3,6005	3,5985
12	3,7020	3,6970	3,6545	3,6485	3,6410	3,6345	3,6285	3,6245	3,6205	3,6185
13	3,5860	3,5835	3,5415	3,5355	3,5280	3,5220	3,5165	3,5125	3,5085	3,5065
14	3,6740	3,6710	3,6290	3,6230	3,6160	3,6100	3,6040	3,6010	3,5970	3,5950
15	3,5790	3,5760	3,5300	3,5240	3,5155	3,5090	3,5025	3,4985	3,4945	3,4925
16	3,5330	3,5285	3,4875	3,4820	3,4745	3,4685	3,5630	3,4590	3,4555	3,4535
17	3,5680	3,5645	3,5200	3,5135	3,5050	3,4985	3,4925	3,4885	3,4840	3,4820
18	3,6930	3,6895	3,6490	3,6430	3,6355	3,6295	3,6245	3,6205	3,6170	3,6150
19	3,6920	3,6885	3,6455	3,6395	3,6320	3,6260	3,6200	3,6165	3,6125	3,6105
20	3,7225	3,7190	3,6785	3,6725	3,6650	3,6595	3,6535	3,6505	3,6460	3,6445
21	3,5355	3,5320	3,4910	3,4850	3,4775	3,4710	3,4655	3,4620	3,4580	3,4560
22	3,5500	3,5470	3,5020	3,4960	3,4880	3,4815	3,4760	3,4725	3,4685	3,4660
23	3,5960	3,5930	3,5485	3,5425	3,5350	3,5280	3,5220	3,5190	3,5145	3,5120
24	3,5090	3,5060	3,4635	3,4580	3,4505	3,4440	3,4385	3,4350	3,4310	3,4290
25	3,6490	3,6480	3,6035	3,5975	3,5895	3,5830	3,5770	3,5730	3,5685	3,5670
26	3,4905	3,4885	3,4465	3,4405	3,4330	3,4265	3,4205	3,4180	3,4140	3,4120
27	3,6035	3,6010	3,5575	3,5515	3,5445	3,5375	3,5320	3,5285	3,5245	3,5230
28	3,6220	3,6195	3,5745	3,5680	3,5600	3,5530	3,5470	3,5430	3,5385	3,5365
29	3,4410	3,4385	3,3965	3,3910	3,3840	3,3780	3,3725	3,3685	3,3650	3,3630
30	3,5490	3,5465	3,5020	3,4955	3,4880	3,4815	3,4755	3,4720	3,4680	3,4660

Fonte: elaborado pelo autor.

## **APÊNDICE D – Dimensões dos corpos de prova**

CP	CC		CAA		CAA-RCV	
	Altura Média (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Altura Média (mm)	Diâmetro Médio (mm)	Altura Média (mm)	Diâmetro Médio (mm)
01	191,60	100,50	192,83	100,03	187,13	100,17
02	195,23	100,23	190,63	100,00	192,07	100,00
03	192,13	99,87	194,63	100,05	193,60	99,90
04	194,53	100,53	188,23	100,58	189,97	99,93
05	196,27	100,30	192,10	100,53	196,87	100,00
06	194,13	100,07	194,68	100,33	189,87	100,00
07	194,27	100,30	190,07	100,40	194,30	100,17
08	190,68	100,30	190,63	100,40	193,57	99,90
09	196,13	101,00	192,00	100,17	196,37	99,93
10	195,90	100,52	192,13	100,20	192,03	99,90
11	193,63	100,00	190,40	100,43	193,60	99,73
12	195,60	100,60	191,63	100,08	194,30	100,20
13	195,87	99,92	193,43	100,07	188,33	100,00
14	192,75	100,08	193,10	100,28	191,93	99,87
15	194,28	100,17	193,17	99,82	190,73	100,03
16	196,60	100,03	190,72	99,77	185,63	100,10
17	196,13	100,20	189,67	100,03	189,33	100,23
18	195,63	100,37	192,83	101,10	192,27	100,43
19	194,83	100,30	194,35	99,90	193,40	100,37
20	196,37	99,83	190,30	100,37	194,20	100,10
21	194,17	100,10	187,77	99,73	190,47	100,00
22	193,10	100,13	185,43	99,93	187,70	100,10
23	195,47	100,33	194,30	100,87	189,50	100,50
24	192,07	99,70	192,57	100,00	185,87	100,00
25	191,57	100,40	190,52	101,37	191,33	100,47
26	193,87	100,20	195,53	99,92	184,03	100,30
27	195,87	100,63	194,97	101,00	189,87	99,93
28	194,27	100,07	183,43	100,25	192,30	100,30
29	187,53	100,73	192,83	101,00	180,60	100,00
30	191,57	99,93	192,17	100,53	186,20	100,23

Fonte: elaborado pelo autor.

## **APÊNDICE E – Densidade dos corpos de prova no estado endurecido**

## E1 CC

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
01	2,4202	2,4212	2,3972	2,3941	2,3909	2,3863	2,3817	2,3784	-	2,3742
02	2,4362	2,4381	2,4157	2,4128	2,4099	2,4054	2,4015	2,3982	-	2,3940
03	2,4379	2,4396	2,4156	2,4125	2,4093	2,4043	2,4000	2,3967	-	2,3920
04	2,4132	2,4135	2,3915	2,3883	2,3851	2,3805	2,3763	2,3727	-	2,3685
05	2,4008	2,4018	2,3802	2,3771	2,3740	2,3695	2,3653	2,3621	-	2,3579
06	2,4264	2,4277	2,4035	2,4004	2,3972	2,3927	2,3884	2,3851	-	2,3805
07	2,4092	2,4089	2,3854	2,3823	2,3793	2,3744	2,3701	2,3669	-	2,3623
08	2,4137	2,4140	2,3898	2,3863	2,3828	2,3782	2,3739	2,3702	-	2,3656
09	2,3705	2,3718	2,3492	2,3459	2,3425	2,3381	2,3339	2,3304	-	2,3263
10	2,3930	2,3936	2,3702	2,3669	2,3637	2,3592	2,3550	2,3515	-	2,3473
11	2,4214	2,4224	2,3981	2,3948	2,3915	2,3869	2,3823	2,3787	-	2,3741
12	2,3898	2,3904	2,3670	2,3639	2,3609	2,3564	2,3522	2,3490	-	2,3445
13	2,4375	2,4375	2,4134	2,4115	2,4069	2,4024	2,3981	2,3949	-	2,3897
14	2,4127	2,4136	2,3879	2,3859	2,3813	2,3767	2,3721	2,3688	-	2,3642
15	2,4254	2,4278	2,4027	2,4007	2,3965	2,3916	2,3877	2,3844	-	2,3798
16	2,4121	2,4153	2,3895	2,3878	2,3833	2,3788	2,3746	2,3710	-	2,3665
17	2,4117	2,4150	2,3904	2,3888	2,3843	2,3797	2,3755	2,3723	-	2,3681
18	2,4131	2,4151	2,3902	2,3886	2,3837	2,3792	2,3750	2,3711	-	2,3669
19	2,4185	2,4198	2,3970	2,3954	2,3908	2,3866	2,3824	2,3792	-	2,3753
20	2,4116	2,4123	2,3882	2,3866	2,3817	2,3772	2,3726	2,3690	-	2,3642
21	2,4270	2,4283	2,4041	2,4024	2,3979	2,3933	2,3890	2,3854	-	2,3812
22	2,4309	2,4309	2,4075	2,4055	2,4013	2,3967	2,3927	2,3891	-	2,3852
23	2,4055	2,4061	2,3835	2,3812	2,3770	2,3721	2,3676	2,3644	-	2,3598
24	2,4419	2,4426	2,4179	2,4159	2,4109	2,4062	2,4019	2,3985	-	2,3939
25	2,3925	2,3928	2,3678	2,3658	2,3608	2,3562	2,3516	2,3480	-	2,3437
26	2,4099	2,4105	2,3860	2,3837	2,3788	2,3742	2,3696	2,3664	-	2,3618
27	2,3927	2,3946	2,3692	2,3673	2,3622	2,3577	2,3532	2,3497	-	2,3452
28	2,4146	2,4149	2,3920	2,3904	2,3858	2,3812	2,3773	2,3737	-	2,3697
29	2,3773	2,3773	2,3539	2,3522	2,3472	2,3428	2,3388	2,3355	-	2,3311
30	2,4465	2,4488	2,4232	2,4212	2,4165	2,4119	2,4076	2,4039	-	2,3999

Fonte: elaborado pelo autor.

## E2 CAA

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
01	2,4239	2,4256	2,4035	2,3946	2,3886	-	2,3817	2,3784	2,3761	2,3741
02	2,4158	2,4178	2,3961	2,3861	2,3794	-	2,3720	2,3684	2,3654	2,3637
03	2,4092	2,4112	2,3896	2,3801	2,3739	-	2,3670	2,3638	2,3612	2,3592
04	2,3996	2,4013	2,3789	2,3698	2,3631	-	2,3558	2,3524	2,3494	2,3478
05	2,3946	2,3962	2,3739	2,3648	2,3582	-	2,3513	2,3477	2,3451	2,3435
06	2,4086	2,4103	2,3892	2,3801	2,3742	-	2,3674	2,3638	2,3615	2,3599
07	2,4017	2,4021	2,3801	2,3705	2,3642	-	2,3572	2,3539	2,3509	2,3492
08	2,3966	2,3972	2,3764	2,3671	2,3608	-	2,3535	2,3502	2,3476	2,3459
09	2,4181	2,4181	2,3976	2,3886	2,3820	-	2,3754	2,3721	2,3698	2,3682
10	2,4075	2,4078	2,3867	2,3771	2,3709	-	2,3636	2,3600	2,3573	2,3557
11	2,4009	2,4022	2,3817	2,3724	2,3661	-	2,3588	2,3555	2,3528	2,3512
12	2,4095	2,4111	2,3896	2,3806	2,3740	-	2,3667	2,3637	2,3607	2,3594
13	2,4082	2,4089	2,3878	2,3783	2,3721	-	2,3652	2,3619	2,3592	2,3576
14	2,3898	2,3905	2,3695	2,3600	2,3538	-	2,3466	2,3433	2,3403	2,3387
15	2,4041	2,4051	2,3833	2,3734	2,3667	-	2,3595	2,3562	2,3535	2,3519
16	2,4244	2,4257	2,4032	2,3935	2,3875	-	2,3804	2,3771	2,3744	2,3727
17	2,4067	2,4074	2,3856	2,3758	2,3698	-	2,3624	2,3594	2,3564	2,3547
18	2,3730	2,3730	2,3520	2,3433	2,3378	-	2,3311	2,3278	2,3256	2,3239
19	2,4167	2,4180	2,3970	2,3875	2,3816	-	2,3743	2,3714	2,3688	2,3668
20	2,3612	2,3629	2,3406	2,3306	2,3243	-	2,3170	2,3137	2,3107	2,3087
21	2,4304	2,4304	2,4082	2,3990	2,3929	-	2,3864	2,3830	2,3799	2,3789
22	2,4050	2,4047	2,3827	2,3734	2,3669	-	2,3597	2,3566	2,3538	2,3518
23	2,3676	2,3683	2,3480	2,3387	2,3325	-	2,3255	2,3222	2,3197	2,3181
24	2,4021	2,4031	2,3803	2,3710	2,3644	-	2,3575	2,3542	2,3512	2,3496
25	2,3525	2,3538	2,3337	2,3242	2,3181	-	2,3112	2,3080	2,3057	2,3038
26	2,4097	2,4107	2,3895	2,3801	2,3742	-	2,3670	2,3634	2,3611	2,3595
27	2,3511	2,3527	2,3316	2,3223	2,3162	-	2,3088	2,3056	2,3031	2,3015
28	2,4087	2,4104	2,3890	2,3800	2,3741	-	2,3672	2,3645	2,3617	2,3600
29	2,3535	2,3525	2,3311	2,3221	2,3159	-	2,3088	2,3056	2,3030	2,3010
30	2,3944	2,3931	2,3735	2,3639	2,3580	-	2,3512	2,3479	2,3456	2,3440

Fonte: elaborado pelo autor.

## E3 CAA-RCV

CP	3 dias	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	35 dias	42 dias	49 dias	56 dias	63 dias
01	2,4375	2,4355	2,4070	2,4033	2,3979	2,3938	2,3901	2,3877	2,3850	2,3840
02	2,4114	2,4226	2,3941	2,3901	2,3848	2,3809	2,3769	2,3746	2,3716	2,3706
03	2,4356	2,4343	2,4063	2,4026	2,3974	2,3934	2,3895	2,3868	2,3842	2,3829
04	2,4141	2,4121	2,3819	2,3775	2,3721	2,3681	2,3634	2,3611	2,3584	2,3574
05	2,4163	2,4143	2,3855	2,3817	2,3762	2,3723	2,3684	2,3658	2,3632	2,3619
06	2,4326	2,4306	2,4021	2,3977	2,3927	2,3883	2,3846	2,3820	2,3793	2,3779
07	2,4162	2,4142	2,3871	2,3832	2,3780	2,3741	2,3702	2,3675	2,3649	2,3636
08	2,4499	2,4472	2,4205	2,4169	2,4120	2,4080	2,2904	2,4017	2,3991	2,3981
09	2,4373	2,4351	2,4068	2,4026	2,3977	2,3935	2,3896	2,3873	2,3844	2,3834
10	2,4216	2,4193	2,3907	2,3867	2,3811	2,3771	2,3728	2,3704	2,3674	2,3664
11	2,4348	2,4332	2,4037	2,3998	2,3942	2,3899	2,3859	2,3829	2,3806	2,3793
12	2,4162	2,4130	2,3852	2,3813	2,3764	2,3722	2,3683	2,3656	2,3630	2,3617
13	2,4243	2,4226	2,3943	2,3902	2,3851	2,3811	2,3774	2,3746	2,3719	2,3706
14	2,4438	2,4418	2,4138	2,4098	2,4052	2,4012	2,3972	2,3952	2,3925	2,3912
15	2,3876	2,3856	2,3549	2,3509	2,3452	2,3409	2,3365	2,3339	2,3312	2,3299
16	2,4184	2,4153	2,3873	2,3835	2,3784	2,3743	2,4389	2,3678	2,3654	2,3640
17	2,3883	2,3859	2,3561	2,3518	2,3461	2,3418	2,3377	2,3351	2,3320	2,3307
18	2,4245	2,4222	2,3957	2,3917	2,3868	2,3829	2,3796	2,3769	2,3746	2,3733
19	2,4129	2,4106	2,3825	2,3786	2,3737	2,3697	2,3658	2,3635	2,3609	2,3596
20	2,4357	2,4334	2,4069	2,4030	2,3981	2,3945	2,3906	2,3886	2,3857	2,3847
21	2,3634	2,3611	2,3337	2,3297	2,3247	2,3203	2,3166	2,3143	2,3116	2,3103
22	2,4033	2,4013	2,3708	2,3667	2,3613	2,3569	2,3532	2,3508	2,3481	2,3464
23	2,3922	2,3902	2,3606	2,3566	2,3516	2,3469	2,3429	2,3409	2,3379	2,3363
24	2,4038	2,4017	2,3726	2,3688	2,3637	2,3592	2,3555	2,3531	2,3503	2,3490
25	2,4057	2,4051	2,3757	2,3718	2,3665	2,3622	2,3583	2,3556	2,3527	2,3517
26	2,4005	2,3991	2,3702	2,3661	2,3609	2,3565	2,3523	2,3506	2,3479	2,3465
27	2,4197	2,4180	2,3888	2,3848	2,3801	2,3754	2,3717	2,3694	2,3667	2,3657
28	2,3838	2,3822	2,3526	2,3483	2,3430	2,3384	2,3345	2,3318	2,3289	2,3276
29	2,4259	2,4242	2,3946	2,3907	2,3857	2,3815	2,3776	2,3748	2,3723	2,3709
30	2,4155	2,4138	2,3835	2,3791	2,3740	2,3696	2,3655	2,3631	2,3604	2,3590

Fonte: elaborado pelo autor.

## **APÊNDICE F – Variação de massa antes e após aquecimento**

## F1 CC

Temperatura (°C)	CP	Massa antes do forno (kg)	Massa depois do forno (kg)	Varição de Massa (%)
Ambiente	01	-	-	-
	02	-	-	-
	03	-	-	-
	04	-	-	-
	05	-	-	-
	06	-	-	-
200	07	3,6260	3,4605	4,56
	08	3,5640	3,3990	4,63
	09	3,6555	3,4860	4,64
	10	3,6490	3,4795	4,65
	11	3,6105	3,4405	4,71
	12	3,6450	3,4770	4,61
400	13	3,6700	3,4580	5,78
	14	3,5845	3,3745	5,86
	15	3,6430	3,4340	5,74
	16	3,6560	3,4450	5,77
	17	3,6615	3,4465	5,87
	18	3,6625	3,4500	5,80
600	19	3,6555	3,4130	6,63
	20	3,6330	3,3820	6,91
	21	3,6375	3,3890	6,83
	22	3,6260	3,3845	6,66
	23	3,6460	3,3905	7,01
	24	3,5890	3,3430	6,85
800	25	3,5525	3,2870	7,47
	26	3,6085	3,3395	7,45
	27	3,6520	3,3775	7,52
	28	3,6185	3,3515	7,38
	29	3,4830	3,2190	7,58
	30	3,6045	3,3430	7,25

Fonte: elaborado pelo autor.

## F2 CAA

Temperatura (°C)	CP	Massa antes do forno (kg)	Massa depois do forno (kg)	Varição de Massa (%)
Ambiente	01	-	-	-
	02	-	-	-
	03	-	-	-
	04	-	-	-
	05	-	-	-
	06	-	-	-
200	07	3,5350	3,3785	4,43
	08	3,5405	3,3830	4,45
	09	3,5830	3,4290	4,30
	10	3,5690	3,4105	4,44
	11	3,5465	3,3995	4,14
	12	3,5570	3,3990	4,44
400	13	3,5848	3,3865	5,53
	14	3,5658	3,3600	5,77
	15	3,5537	3,3535	5,63
	16	3,5347	3,3370	5,59
	17	3,5082	3,3090	5,68
	18	3,5957	3,3995	5,46
600	19	3,6045	3,3655	6,63
	20	3,4750	3,2255	7,18
	21	3,4885	3,2655	6,39
	22	3,4195	3,1865	6,81
	23	3,5975	3,3555	6,73
	24	3,5520	3,3095	6,83
800	25	3,5400	3,2895	7,08
	26	3,6155	3,3525	7,27
	27	3,5930	3,3210	7,57
	28	3,4150	3,1750	7,03
	29	3,5530	3,2885	7,44
	30	3,5735	3,3160	7,21

Fonte: elaborado pelo autor.

## F3 CAA-RCV

Temperatura (°C)	CP	Massa antes do forno (kg)	Massa depois do forno (kg)	Variação de Massa (%)
Ambiente	01	-	-	-
	02	-	-	-
	03	-	-	-
	04	-	-	-
	05	-	-	-
	06	-	-	-
200	07	3,6190	3,4630	4,31
	08	3,6385	3,4825	4,29
	09	3,6710	3,5120	4,33
	10	3,5620	3,4030	4,46
	11	3,5985	3,4375	4,47
	12	3,6185	3,4570	4,46
400	13	3,5055	3,3045	5,73
	14	3,5945	3,3915	5,65
	15	3,4915	3,2760	6,17
	16	3,4530	3,2555	5,72
	17	3,4815	3,2675	6,15
	18	3,6140	3,4105	5,63
600	19	3,6095	3,3685	6,68
	20	3,6435	3,4040	6,57
	21	3,4550	3,2175	6,87
	22	3,4650	3,2265	6,88
	23	3,5110	3,2690	6,89
	24	3,4275	3,1950	6,78
800	25	3,5650	3,2880	7,77
	26	3,4100	3,1510	7,60
	27	3,5210	3,2575	7,48
	28	3,5345	3,2500	8,05
	29	3,3610	3,1050	7,62
	30	3,4640	3,1895	7,92

Fonte: elaborado pelo autor.

## **APÊNDICE G – Velocidade de pulso ultrassônico antes e após aquecimento**

## G1 CC

CP	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado (m/s)	Temperatura (°C)	Tempo (µs)	Velocidade (m/s)	Valor Analisado (m/s)
01	20	42,0	4562	4562	20	-	-	-
02	20	42,6	4583	4583	20	-	-	-
03	20	42,5	4526	Espúrio	20	-	-	-
04	20	42,7	4561	4561	20	-	-	-
05	20	42,1	4668	Espúrio	20	-	-	-
06	20	42,3	4595	4595	20	-	-	-
07	20	42,6	4560	4560	200	48,8	3985	3985
08	20	42,1	4530	Espúrio	200	48,1	3968	3968
09	20	42,8	4583	4583	200	49,5	3962	3962
10	20	43,0	4556	4556	200	50,2	3906	3906
11	20	42,6	4551	4551	200	50,5	3834	Espúrio
12	20	42,3	4624	Espúrio	200	49,4	3963	3960
13	20	42,8	4577	4577	400	60,3	3251	Espúrio
14	20	42,5	4536	Espúrio	400	59,8	3226	3226
15	20	42,2	4609	4609	400	60,9	3193	3193
16	20	43,2	4551	4551	400	63,0	3123	Espúrio
17	20	43,1	4556	4556	400	62,8	3126	Espúrio
18	20	42,4	4614	4614	400	61,7	3173	3173
19	20	41,9	4650	Espúrio	600	121,3	1594	Espúrio
20	20	43,3	4535	Espúrio	600	131,3	1497	1497
21	20	42,2	4601	4601	600	126,5	1536	1563
22	20	42,3	4565	4565	600	124,7	1549	1549
23	20	42,7	4583	4583	600	131,0	1492	1492
24	20	41,6	4622	Espúrio	600	126,8	1516	1516
25	20	41,9	4572	4572	800	151,4	1266	1266
26	20	42,8	4530	Espúrio	800	160,9	1205	1205
27	20	42,7	4587	4587	800	156,1	1255	1255
28	20	42,0	4631	Espúrio	800	157,0	1238	1238
29	20	41,6	4513	Espúrio	800	153,1	1225	1225
30	20	41,6	4610	4610	800	142,1	1349	Espúrio

Fonte: elaborado pelo autor.

## G2 CAA

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	4548	4548	20	-	-	-
2	20	42,4	4501	4501	20	-	-	-
3	20	42,9	4537	4537	20	-	-	-
4	20	41,6	4530	4530	20	-	-	-
5	20	42,3	4547	4547	20	-	-	-
6	20	42,9	4538	4538	20	-	-	-
7	200	41,9	4537	4537	200	47,5	4006	Espúrio
8	200	41,9	4555	4555	200	47,5	4013	Espúrio
9	200	42,2	4550	4550	200	48,2	3933	3933
10	200	42,5	4521	4521	200	49,0	3922	3922
11	200	42,2	4517	4517	200	49,2	3874	Espúrio
12	200	42,2	4446	Espúrio	200	48,6	3947	3947
13	400	42,9	4509	4509	400	62,5	3095	3095
14	400	43,2	4470	Espúrio	400	61,6	3137	Espúrio
15	400	43,0	4498	4498	400	62,5	3091	Espúrio
16	400	42,0	4547	4547	400	61,2	3119	3119
17	400	42,0	4522	4522	400	60,9	3117	3117
18	400	42,4	4548	4548	400	62,0	3110	3110
19	600	42,9	4530	4530	600	95,4	2039	Espúrio
20	600	42,7	4457	Espúrio	600	95,9	1986	1986
21	600	41,4	4535	4535	600	93,6	2007	2007
22	600	41,6	4457	Espúrio	600	77,2	2012	2012
23	600	43,1	4513	4513	600	96,5	2014	2014
24	600	43,0	4484	4484	600	99,9	1930	Espúrio
25	800	41,9	4547	4547	800	130,1	1464	1464
26	800	43,6	4490	4490	800	133,0	1470	1470
27	800	44,0	4436	Espúrio	800	132,0	1477	Espúrio
28	800	40,5	4535	4535	800	128,0	1434	Espúrio
29	800	42,7	4516	4516	800	132,5	1456	1456
30	800	41,7	4608	Espúrio	800	130,8	1469	1469

Fonte: elaborado pelo autor.

## G3 CAA-RCV

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	40,3	4644	4644	20	-	-	-
2	20	41,8	4595	Espúrio	20	-	-	-
3	20	41,5	4665	4665	20	-	-	-
4	20	40,9	4644	4644	20	-	-	-
5	20	42,1	4682	4682	20	-	-	-
6	20	40,6	4682	4682	20	-	-	-
7	200	41,9	4637	4637	200	48,5	4007	4007
8	200	41,4	4675	4675	200	48,1	4028	4028
9	200	42,0	4681	4681	200	48,4	4061	Espúrio
10	200	41,1	4678	4678	200	47,5	4047	4047
11	200	42,1	4604	Espúrio	200	48,4	4004	4004
12	200	42,4	4583	Espúrio	200	48,6	4002	4002
13	400	40,1	4702	4702	400	55,4	3403	Espúrio
14	400	40,9	4692	4692	400	57,4	3347	3347
15	400	41,2	4635	4635	400	56,9	3352	3352
16	400	40,1	4635	4635	400	56,5	3286	3286
17	400	40,9	4629	Espúrio	400	57,8	3276	3276
18	400	41,0	4695	4695	400	58,5	3289	3289
19	600	41,4	4677	4677	600	93,2	2077	2077
20	600	41,8	4652	4652	600	93,3	2082	2082
21	600	40,0	4768	Espúrio	600	90,6	2103	Espúrio
22	600	40,2	4675	4675	600	90,2	2082	2082
23	600	40,6	4668	4668	600	93,6	2025	Espúrio
24	600	39,8	4676	4676	600	92,4	2011	Espúrio
25	800	40,9	4678	4678	800	119,0	1608	1608
26	800	39,4	4671	4671	800	114,1	1613	Espúrio
27	800	40,5	4694	4694	800	120,0	1583	1583
28	800	41,2	4667	4667	800	120,1	1602	1602
29	800	38,2	4734	Espúrio	800	115,4	1565	Espúrio
30	800	39,5	4720	Espúrio	800	118,1	1577	1577

Fonte: elaborado pelo autor.

**APÊNDICE H – Resistência à compressão dos corpos de prova expostos aos patamares de temperatura**

## H1 CC

Temperatura	CP	Força (kN)	F <sub>CK</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
Ambiente	1	319,26	40,25			
	2	319,73	40,52	40,25	2,46	6,11
	3	283,00	36,13			
	4	290,85	36,64			
	5	319,76	40,47	-	-	-
	6	318,51	40,50			
200°C	7	255,37	32,32			
	8	286,74	36,29	36,29	2,88	7,94
	9	303,81	37,92			
	10	284,80	35,89			
	11	263,27	33,52	-	-	-
	12	282,73	35,57			
400°C	13	211,08	26,92			
	14	216,94	27,58	26,92	0,55	2,03
	15	208,75	26,49			
	16	207,17	26,36			
	17	211,17	26,78	-	-	-
	18	209,82	26,52			
600°C	19	118,91	15,05			
	20	119,06	15,21	15,05	0,89	5,93
	21	106,95	13,59			
	22	105,86	13,44			
	23	99,94	12,64	-	-	-
	24	95,93	12,29			
800°C	25	49,75	6,28			
	26	53,78	6,82	6,66	0,28	4,14
	27	52,97	6,66			
	28	45,38	5,77			
	29	49,89	6,26	-	-	-
	30	46,20	5,89			

Fonte: elaborado pelo autor.

## H2 CAA

Temperatura	CP	Força (kN)	F <sub>CK</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
Ambiente	1	333,57	42,44			
	2	327,94	41,75	42,44	1,04	2,45
	3	344,35	43,80			
	4	318,18	40,04			
	5	340,40	42,88	-	-	-
	6	326,85	41,34			
200°C	7	281,87	35,60			
	8	322,83	40,78	40,12	2,82	7,02
	9	316,16	40,12			
	10	308,17	39,08			
	11	293,03	36,99	-	-	-
	12	316,76	40,26			
400°C	13	217,07	27,60			
	14	235,31	29,79	27,60	1,38	5,01
	15	213,08	27,23			
	16	220,21	28,17			
	17	229,61	29,21	-	-	-
	18	234,03	29,15			
600°C	19	132,31	16,88			
	20	133,30	16,85	16,88	0,20	1,21
	21	134,50	17,22			
	22	139,09	17,73			
	23	140,28	17,56	-	-	-
	24	137,64	17,53			
800°C	25	68,89	8,54			
	26	61,39	7,83	8,03	0,37	4,55
	27	64,30	8,03			
	28	66,26	8,39			
	29	61,72	7,70	-	-	-
	30	69,28	8,73			

Fonte: elaborado pelo autor.

## H3 CAA-RCV

Temperatura	CP	Força (kN)	F <sub>CK</sub> (MPa)	F <sub>MÉD</sub> (MPa)	Desv. Padrão (MPa)	Coef. Variação (%)
Ambiente	1	362,02	45,94			
	2	358,44	45,64	45,83	0,15	0,33
	3	359,23	45,83			
	4	355,61	45,34			
	5	363,56	46,29	-	-	-
	6	371,21	47,26			
200°C	7	348,23	44,19			
	8	363,23	46,34	44,19	1,41	3,19
	9	342,68	43,69			
	10	347,02	44,27			
	11	326,94	41,85	-	-	-
	12	346,56	43,95			
400°C	13	286,64	36,50			
	14	298,91	38,16	36,50	1,71	4,67
	15	273,10	34,75			
	16	267,02	33,93			
	17	242,75	30,76	-	-	-
	18	271,05	34,21			
600°C	19	180,12	22,77			
	20	216,34	27,49	24,92	2,37	9,49
	21	195,71	24,92			
	22	175,25	22,27			
	23	180,24	22,72	-	-	-
	24	173,78	22,13			
800°C	25	111,16	14,02			
	26	106,74	13,51	13,51	0,52	3,84
	27	101,85	12,99			
	28	93,24	11,80			
	29	94,88	12,08	-	-	-
	30	95,54	12,11			

Fonte: elaborado pelo autor.

**APÊNDICE I – Módulo de elasticidade dos corpos de prova expostos aos patamares de temperatura**

## II CC

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Observado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (Gpa)
Ambiente	1	40,25	-	-	-
	2	40,52	-	-	-
	3	36,13	-	-	-
	4	36,64	31,81	31,81	
	5	40,47	33,07	33,07	32,60
	6	40,50	32,91	32,91	
200°C	7	32,32	-	-	-
	8	36,29	-	-	-
	9	37,92	-	-	-
	10	35,89	23,76	23,76	
	11	33,52	22,35	22,35	22,93
	12	35,57	22,67	22,67	
400°C	13	26,92	-	-	-
	14	27,58	-	-	-
	15	26,49	-	-	-
	16	26,36	13,29	13,29	
	17	26,78	13,59	13,59	13,39
	18	26,52	13,29	13,29	
600°C	19	15,05	-	-	-
	20	15,21	-	-	-
	21	13,59	-	-	-
	22	13,44	4,62	Espúrio (Módulo)	
	23	12,64	4,19	4,19	4,18
	24	12,29	4,18	4,18	
800°C	25	6,28	-	-	-
	26	6,82	-	-	-
	27	6,66	-	-	-
	28	5,77	2,77	2,77	
	29	6,26	2,81	2,81	2,77
	30	5,89	2,71	2,71	

Fonte: elaborado pelo autor.

## I2 CAA

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Observado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (Gpa)
Ambiente	1	42,44	-	-	-
	2	41,75	-	-	-
	3	43,80	-	-	-
	4	40,04	28,53	28,53	
	5	42,88	29,13	29,13	28,66
	6	41,34	28,32	28,32	
200°C	7	35,60	-	-	-
	8	40,78	-	-	-
	9	40,12	-	-	-
	10	39,08	21,43	21,43	
	11	36,99	22,37	22,37	21,78
	12	40,26	21,54	21,54	
400°C	13	27,60	-	-	-
	14	29,79	-	-	-
	15	27,23	-	-	-
	16	28,17	12,17	12,17	
	17	29,21	12,63	12,63	12,49
	18	29,15	12,66	12,66	
600°C	19	16,88	-	-	-
	20	16,85	-	-	-
	21	17,22	-	-	-
	22	17,73	5,05	5,05	
	23	17,56	5,18	5,18	5,08
	24	17,53	5,02	5,02	
800°C	25	8,54	-	-	-
	26	7,83	-	-	-
	27	8,03	-	-	-
	28	8,39	3,99	Espúrio (Módulo)	
	29	7,70	3,60	3,60	3,68
	30	8,73	3,77	3,77	

Fonte: elaborado pelo autor.

## I3 CAA-RCV

Temperatura	CP	fc (MPa)	Eci,i Valor Observado (GPa)	Eci,i Valor Analisado (GPa)	Eci,m (Gpa)
Ambiente	1	45,94	-	-	-
	2	45,64	-	-	-
	3	45,83	-	-	-
	4	45,34	29,45	29,45	
	5	46,29	29,79	29,79	30,09
	6	47,26	31,03	31,03	
200°C	7	44,19	-	-	-
	8	46,34	-	-	-
	9	43,69	-	-	-
	10	44,27	25,51	25,51	
	11	41,85	25,40	25,40	25,21
	12	43,95	24,73	24,73	
400°C	13	36,50	-	-	-
	14	38,16	-	-	-
	15	34,75	-	-	-
	16	33,93	14,70	14,70	
	17	30,76	14,16	14,16	14,39
	18	34,21	14,31	14,31	
600°C	19	22,77	-	-	-
	20	27,49	-	-	-
	21	24,92	-	-	-
	22	22,27	5,98	5,98	
	23	22,72	6,17	6,17	6,21
	24	22,13	6,48	6,48	
800°C	25	14,02	-	-	-
	26	13,51	-	-	-
	27	12,99	-	-	-
	28	11,80	4,40	4,40	
	29	12,08	4,35	4,35	4,27
	30	12,11	4,07	4,07	

Fonte: elaborado pelo autor.