

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-graduação em Construção Civil**

Paulo Henrique Vaz da Silva

**USO DE AGREGADO RECICLADO MIÚDO COMO AGENTE DE CURA INTERNA  
EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Belo Horizonte  
2023

Paulo Henrique Vaz da Silva

**USO DE AGREGADO RECICLADO MIÚDO COMO AGENTE DE CURA INTERNA  
EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Tecnologia na Construção Civil. Linha de pesquisa: Materiais de Construção Civil

Orientador: Prof. Dr. Fernando do Couto Rosa Almeida

Belo Horizonte

2023

S586u

Silva, Paulo Henrique Vaz da.

Uso de agregado reciclado miúdo como agente de cura interna em compósitos cimentícios [recurso eletrônico] / Paulo Henrique Vaz da Silva. – 2023.

1 recurso online (167 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Fernando do Couto Rosa Almeida.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 144-167.

Bibliografia: f. 136-143.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil - Teses. 2. Materiais de construção - Teses.  
3. Agregados (Materiais de construção) - Teses. 4. Argamassa - Teses.  
5. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.) - Teses. I. Almeida, Fernando do Couto Rosa. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Reginaldo César Vital dos Santos CRB/6 2165  
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

Paulo Henrique Vaz da Silva



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL  
MESTRADO EM CONSTRUÇÃO CIVIL



## ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DO ALUNO PAULO HENRIQUE VAZ DA SILVA

Realizou-se, no dia 18 de setembro de 2023 às 14:30 horas, via Plataforma Online (Microsoft Teams), a defesa de dissertação intitulada USO DE AGREGADO RECICLADO MIÚDO COMO AGENTE DE CURA INTERNA EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS, apresentada por PAULO HENRIQUE VAZ DA SILVA, número de registro 2021660065, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em CONSTRUÇÃO CIVIL na Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, à seguinte Comissão Examinadora: Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida - Orientador (UFMG), Profa. Dayana Cristina Silva Garcia (UFMG) e Profa. Alessandra Lorenzetti de Castro (USP).

A Comissão considerou a dissertação:

( X ) Aprovada

( ) Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 18 de setembro de 2023.

Fernando do Couto  
Rosa  
Almeida:36857996814  
Date: 2023.09.18 17:16:35 -03'00'

Digitally signed by Fernando do  
Couto Rosa  
Almeida:36857996814

Prof. Fernando do Couto Rosa Almeida ( Doutor )

Dayana Cristina Silva  
Garcia:10303489600  
Dados: 2023.09.18 19:04:06 -03'00'

Assinado de forma digital por Dayana  
Cristina Silva Garcia:10303489600

Profa. Dayana Cristina Silva Garcia ( Doutora )

Alessandra Lorenzetti  
de Castro: 83404236149  
Dados: 2023.09.20 08:37:49 -03'00'

Assinado de forma digital por Alessandra  
Lorenzetti de Castro: 83404236149

Profa. Alessandra Lorenzetti de Castro ( Doutora )

Dedico esse trabalho a minha esposa e aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha esposa, Fernanda, pelo cuidado, compreensão e amor incondicional.

Aos meus pais, por sempre incentivarem a estudar e aprender cada vez mais.

Ao Prof. Dr. Fernando Almeida, pela oportunidade, sobretudo, pela amizade, respeito, confiança e apoio. Agradeço também pelo amplo suporte em todos os momentos da pesquisa e pela confiança deposita em mim.

Aos professores do DEMC/UFMG, sobretudo à Prof.<sup>a</sup> Dra. Dayana Garcia e ao Prof. Dr. White dos Santos, pelo suporte ao longo da pesquisa.

À equipe do CTNano, em especial aos Prof. Dr. José Marcio Fonseca Calixto e Prof. Dr. Manuel Noel Paul Georges Houmard por disponibilização da utilização dos laboratórios.

Ao doutorando Thiago Alex Hemkemeier, da Universidade Federal de São Carlos, pelas orientações na realização do ensaio de retração autógena.

Aos amigos e professores do Laboratório de Materiais de Construção Civil e Mecânica, pelo apoio no decorrer da pesquisa.

Aos alunos de iniciação científica, Thiago Castro e Ana Dayrell, pelo apoio nas atividades laboratoriais.

À Superintendência de Limpeza Urbana, pela doação dos agregados reciclados.

Aos familiares e amigos, pelo carinho e apoio.

Ao DEMC/UFMG, especialmente à secretária Camila, por todo o suporte e pelo atendimento.

## RESUMO

A construção civil é responsável pela geração de significativa quantidade de resíduos sólidos, os quais possuem elevado potencial de serem utilizados como agregados reciclados na produção de concretos e argamassas. Os agregados reciclados diferem dos naturais devido à existência de argamassa aderida junto aos grãos, o que proporciona um aumento da porosidade e absorção de água. Essa absorção de água adicional e sua posterior liberação pode modificar as reações de hidratação da matriz cimentícia. Portanto, o objetivo desse estudo é avaliar a utilização do agregado reciclado miúdo como agente promotor de cura interna em compósitos cimentícios. Foram produzidas argamassas com substituição volumétrica da areia natural por agregado reciclado nos teores de 20% e 40%, com cimentos CPV-ARI e CPIII-RS, e relação água/cimento de 0,42; 0,44 e 0,45. No estado fresco foram avaliadas propriedades físicas das argamassas, enquanto no endurecido avaliou-se tanto as propriedades físicas, quanto mecânicas e de durabilidade até a idade de 91 dias. Os resultados apontaram que, apesar das argamassas com agregado reciclado serem mais absorventes e mais porosas, não foi observada diferença significativa nas resistências à flexão e compressão de amostras com mesma relação a/c. Entretanto, houve redução da resistência mecânica somente para argamassas com 40% de substituição de agregado convencional, utilizando CP III-RS e água adicional. Não foi observada alteração no pico de calor de hidratação nas primeiras horas; entretanto, observou-se uma antecipação de sua ocorrência. Também não foi observado aumento da frente de carbonatação com incorporação do agregado reciclado, tanto para as argamassas produzidas com CPIII-RS, quanto para as com CPV-ARI. A retração por secagem também não apresentou diferenças significativas entre as amostras. Entretanto, para retração autógena, o agregado reciclado agiu de maneira distinta entre os dois tipos de cimento, em função do controle da disponibilidade de água para as reações de hidratação. Para o cimento CPIII-RS, houve um aumento da retração autógena, indicando um aumento da taxa de hidratação desse cimento composto. Para o CPV-ARI, observou-se uma redução da retração autógena, diminuindo os efeitos da rápida reação desse cimento. Portanto, a utilização do agregado reciclado miúdo como agente de cura interna resulta na alteração dos mecanismos de hidratação da matriz cimentícia, e possibilita a manutenção das propriedades mecânicas e de durabilidade equivalentes a argamassas convencionais.

**Palavras-chave:** agregado reciclado; argamassa; cura interna; retração.

## ABSTRACT

The construction industry is responsible for generating a significant amount of solid waste, which has a high potential to be used as recycled aggregates in the production of concrete and mortar. Recycled aggregates differ from natural ones due to the presence of adhered mortar on the grains, which increases porosity and water absorption. This additional water absorption and subsequent release can modify the hydration reactions of the cementitious matrix. Therefore, the objective of this study is to evaluate the use of fine recycled aggregate as an internal curing agent in cementitious composites. Mortars were produced with volumetric substitution of natural sand by recycled aggregate at rates of 20% and 40%, with CPV-ARI and CPIII-RS cements, and w/c ratios of 0,42, 0,44, and 0,45. In the fresh state, the physical properties of the mortars were evaluated, while in the hardened state, both physical and mechanical properties, as well as durability, were evaluated up to 91 days. The results indicated that, although mortars with recycled aggregate were more absorbent and porous, no significant difference was observed in the flexural and compressive strengths of samples with the same w/c ratio. However, there was a reduction in mechanical strength only for mortars with 40% substitution of conventional aggregate, using CP III-RS and additional water. No change in the hydration heat peak was observed in the first hours; however, an anticipation of its occurrence was observed. An increase in autogenous shrinkage was not observed with the incorporation of recycled aggregate, both for mortars produced with CPIII-RS and CPV-ARI. Drying shrinkage also did not show significant differences between the samples. However, for autogenous shrinkage, the recycled aggregate acted differently between the two types of cement, depending on the control of water availability for hydration reactions. For CPIII-RS cement, there was an increase in autogenous shrinkage, indicating an increase in the hydration rate of this composite cement. For CPV-ARI, a reduction in autogenous shrinkage was observed, reducing the effects of the rapid reaction of this cement. Therefore, the use of fine recycled aggregate as an internal curing agent result in the alteration of the hydration mechanisms of the cementitious matrix and allows the maintenance of mechanical and durability properties equivalent to conventional mortars.

**Keywords:** recycled aggregate; mortar; internal curing; shrinkage.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Evolução das publicações entre 2015 e 2021 de trabalhos acadêmicos com as palavras chaves “recycled concrete aggregate”, “durability” e “shrinkage”. .....	25
<b>Figura 2:</b> Ciclo de vida e processo de produção dos agregados reciclados. ....	27
<b>Figura 3:</b> Representação esquemática da dupla zona de transição interfacial (ZTI) existentes entre o agregado reciclado e a nova matriz cimentícia. ....	28
<b>Figura 4:</b> Curva granulométrica do agregado, com representação da zona de utilização....	30
<b>Figura 5:</b> Etapas de hidratação de pastas de cimento Portland .....	34
<b>Figura 6:</b> Fluxograma de atividades. ....	42
<b>Figura 7:</b> Monte de material bruto, anterior ao processamento. ....	45
<b>Figura 8:</b> Material triado, preparado para início da diminuição de granulometria.....	46
<b>Figura 9:</b> a) Britador primário. b) Correia transportadora levando a granulometria intitulada rachão. ....	47
<b>Figura 10:</b> Deck das peneiras e peneirador. ....	48
<b>Figura 11:</b> a) Amostra utilizada para classificação dos agregados reciclados. b) Quadrante selecionado para realização da contagem dos grãos. c) Agregados classificados como grupo 1 (grãos com mais de 50% do seu volume por pasta/argamassa de cimento endurecida). d) Agregados classificados como grupo 2 (grãos com mais de 50% do seu volume por rochas). e) Agregados classificados como grupo 3 (grãos com mais de 50% do seu volume por cerâmica vermelha). ....	49
<b>Figura 12:</b> Ensaio de flow table para determinação da consistência. ....	56
<b>Figura 13:</b> Equipamento utilizado para determinação do teor de ar incorporado.....	57
<b>Figura 14:</b> a) Equipamento utilizado para registrar as temperaturas. b) Garrafa de Langavant juntamente com molde lacrado. ....	58
<b>Figura 15:</b> Ensaio de absorção de água por capilaridade .....	60
<b>Figura 16:</b> a) Recipiente metálico onde os corpos de prova ficam submersos. b) Balança hidrostática utilizada medir a massa imersa do corpo de prova. ....	62

<b>Figura 17:</b> Ensaio de flexão 3 pontos.....	64
<b>Figura 18:</b> Ensaio de compressão.....	65
<b>Figura 19:</b> a) Câmara de carbonatação. b) Esquema leitura.....	66
<b>Figura 20:</b> Ensaio de retração por secagem.....	68
<b>Figura 21:</b> Corpos de prova do ensaio de retração autógena.....	69
<b>Figura 22:</b> Evolução da absorção de água, por imersão, dos agregados miúdos. a) minutos iniciais. b) durante todo o ensaio.....	72
<b>Figura 23:</b> Curva granulométrica dos agregados.....	73
<b>Figura 24:</b> Amostra do agregado reciclado lavado.....	75
<b>Figura 25:</b> Consistência das argamassas pelo ensaio de Flow Table: a) amostras com CPIII-RS; b) amostras com CPV-ARI.....	76
<b>Figura 26:</b> a) Densidade no estado fresco nas argamassas CPIII-RS e CPV-ARI. b) Teor de ar incorporado nas argamassas CPIII-RS e CPV-ARI.....	77
<b>Figura 27:</b> Curva calorimétrica das argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI.....	78
<b>Figura 28:</b> Absorção por capilaridade das argamassas com CPIII-RS e CPV-ARI: a) aos 28 dias; b) aos 91 dias.....	83
<b>Figura 29:</b> Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias de idade: a) amostras com CP III-RS; b) amostras com CPV-ARI.....	86
<b>Figura 30:</b> Resultados do ensaio de índice de vazios aos 28 e 91 dias de idade: a) amostras com CP III-RS; b) amostras com CPV-ARI.....	89
<b>Figura 31:</b> Evolução da resistência à tração por flexão das argamassas: a) CPIII-RS; b) CPV-ARI.....	93
<b>Figura 32:</b> a) Evolução da resistência à compressão, para argamassas. a) CPIII-RS; b) CPV-ARI.....	97
<b>Figura 33:</b> a) Carbonatação do traço CPV-40-2, com exposição de 56 dias dentro da câmara de carbonatação. b) Indício de começo da carbonatação.....	105

<b>Figura 34:</b> a) Carbonatação do traço CPV-40-2, com exposição de 91 dias dentro da câmara de carbonatação. b) Frente de carbonatação, não uniforme. ....	106
<b>Figura 35:</b> a) Corpos de prova, produzidos com CPIII-RS, submetidos a carbonatação por 91 dias. b) Corpos de prova, produzidos com CPV-ARI, submetidos a carbonatação por 91 dias. ....	107
<b>Figura 36:</b> Evolução da frente de carbonatação para argamassas produzidas com CPIII-RS. ....	107
<b>Figura 37:</b> Regressões lineares das curvas de evolução de carbonatação acelerada para argamassas produzidas com CPIII-RS, sendo a) III-R-1, b) III-20-1, c) III-20-2, d) III-40-1 e e) III-40-2. ....	108
<b>Figura 38:</b> Evolução da perda de massa das argamassas, durante o ensaio de retração por secagem. a) CPIII-RS; b) CPV-ARI.....	113
<b>Figura 39:</b> Retração por secagem das argamassas. a) CPIII-RS; b) CPV-ARI.....	114
<b>Figura 40:</b> Retração autógena das argamassas. a) CPIII-RS; b) CPV-ARI. ....	123

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Número de artigos após cada etapa revisão sistemática da literatura. ....	26
<b>Tabela 2:</b> Caracterização química dos agregados reciclados oriundos de diversas fontes. .	31
<b>Tabela 3:</b> Calor liberado pelas principais fases do cimento .....	34
<b>Tabela 4:</b> Caracterização dos cimentos utilizados. ....	43
<b>Tabela 5:</b> Caracterização dos agregados natural e reciclado. ....	48
<b>Tabela 6:</b> Quantidade de material (em massa) necessária para produção de 1 m <sup>3</sup> de argamassa.....	53
<b>Tabela 7:</b> Resumo dos ensaios do estado endurecido. ....	59
<b>Tabela 8:</b> Classificação da resistência à carbonatação para concretos em ambientes urbanos.....	67
<b>Tabela 9:</b> Absorção de água dos agregados miúdos.....	71
<b>Tabela 10:</b> Material pulverulento dos agregados miúdos.....	72
<b>Tabela 11:</b> Densidade na condição seca e na condição de superfície saturada seca dos agregados miúdos. ....	74
<b>Tabela 12:</b> Distribuição do tipo de grão do agregado reciclado. ....	75
<b>Tabela 13:</b> Quantidade de calor máxima liberada e horário de ocorrência. ....	79
<b>Tabela 14:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a quantidade de calor liberado. ....	79
<b>Tabela 15:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a variável a quantidade de calor liberado.....	80
<b>Tabela 16:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado o período em que pico da liberação ocorreu. ....	80
<b>Tabela 17:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a variável hora em que pico da liberação ocorreu.....	81
<b>Tabela 18:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a variável hora em que pico da liberação ocorreu.....	81

<b>Tabela 19:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a absorção por capilaridade. ....	84
<b>Tabela 20:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por capilaridade.....	84
<b>Tabela 21:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por capilaridade.....	85
<b>Tabela 22:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a absorção por imersão.....	86
<b>Tabela 23:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por imersão. ....	87
<b>Tabela 24:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por imersão. ....	87
<b>Tabela 25:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado índice de vazios. ....	90
<b>Tabela 26:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28 e 91 dias, sendo avaliado índice de vazios.....	90
<b>Tabela 27:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado índice de vazios.....	90
<b>Tabela 28:</b> Massas específicas para das argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, com idades de 28 e 91 dias. ....	92
<b>Tabela 29:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado ganho de resistência com o avanço da idade.....	94
<b>Tabela 30:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a diferença de resistência com o passar do tempo. ....	95
<b>Tabela 31:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a diferença de resistência por idades.....	95

<b>Tabela 32:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliada diferença na resistência em virtude do traço. ....	96
<b>Tabela 33:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado ganho de resistência com o avanço da idade.....	98
<b>Tabela 34:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a diferença de resistência com o passar do tempo. ....	99
<b>Tabela 35:</b> Aumento da resistência à compressão das amostras CPIII-RS com o passar do tempo. ....	100
<b>Tabela 36:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliada diferença na resistência em virtude do traço. Valor de F-crítico de 2,7587. ....	100
<b>Tabela 37:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a resistência à compressão em virtude do traço. ....	101
<b>Tabela 38:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a resistência à compressão em virtude do traço. ....	101
<b>Tabela 39:</b> Profundidade de carbonatação das argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI. ....	104
<b>Tabela 40:</b> Coeficiente de carbonatação acelerada e classificação quanto a resistência a carbonatação das argamassas produzidas com CPIII-RS. ....	109
<b>Tabela 41:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a profundidade de carbonatação. Valor de F-crítico de 2,4506. ....	109
<b>Tabela 42:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28, 56 e 91 dias, sendo avaliado a profundidade de carbonatação.....	110
<b>Tabela 43:</b> Aumento percentual da frente de carbonatação, para corpos de prova produzidos com CPIII-RS, submetidos a câmara de carbonatação por 91 dias. ....	111
<b>Tabela 44:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a retração por secagem. ....	114

<b>Tabela 45:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração por secagem. ....	116
<b>Tabela 46:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração por secagem. ....	117
<b>Tabela 47:</b> Detalhamento da retração por secagem, para as argamassas produzidas com CPV-ARI, para as idades de 7, 14 e 28 dias. ....	119
<b>Tabela 48:</b> Detalhamento da retração por secagem, para as argamassas produzidas com CPV-ARI, para as idades de 56, 91 e 120 dias. ....	120
<b>Tabela 49:</b> Perda de massa as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, após 120 dias de ensaio. ....	122
<b>Tabela 50:</b> Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a retração autógena. ....	123
<b>Tabela 51:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 7, 14, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração autógena. ....	124
<b>Tabela 52:</b> Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração autógena. ....	125
<b>Tabela 53:</b> Diferença da retração autógena, para as argamassas produzidas com CPIII-RS, para as idades de 56, 91 e 120 dias. ....	126
<b>Tabela 54:</b> Diferença da retração autógena, para as argamassas produzidas com CPV-ARI, para as idades de 28 e 56 dias. ....	128
<b>Tabela 55:</b> Diferença da retração autógena para as argamassas produzidas com CPV-ARI e agregado reciclado, para as idades de 91 e 120 dias. ....	128

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NBR – Norma brasileira

AR – Agregado reciclado

AN – Agregado natural

RDC – Resíduo de demolição e construção

Conama – Conselho nacional do meio ambiente

ARCO – Agregado reciclado de concreto

ARCI – Agregado reciclado cimentício

ARM – Agregado reciclado misto

SLU – Secretaria de Limpeza Urbana

MG – Minas Gerais

a/c – Relação água/cimento

ABNT – Associação Brasileira de normas técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

ZO – Zona ótima

ZU – Zona utilizável

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_3A$  - aluminato tricálcico

$C_3S$  – silicato tricálcio

$C_2S$  - silicato dicálcio

$C_4AF$  - ferro aluminato tetracálcico

$Ca(OH)_2$  – hidróxido de cálcio

C-S-H – silicato de cálcio hidratado

$CO_2$  – dióxido de carbono

$\mu$  - micro

$^{\circ}C$  – Graus Celsius

kg – Quilograma

J/g – Joule por grama

s – Segundo

min – Minuto

h – Hora

mm – Milímetro

cm – Centímetro

$cm^2/g$  – Centímetro por metro quadrado

MPa – Mega pascal

mL – Mililitros

$\emptyset$  – Diâmetro

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>20</b>
1.1 Justificativa .....	22
1.2 Estrutura do trabalho.....	23
<b>2 OBJETIVO</b> .....	<b>24</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
3.1 Agregado Reciclado .....	26
3.1.1 Densidade .....	28
3.1.2 Absorção de água .....	29
3.1.3 Granulometria .....	30
3.1.4 Composição química .....	31
3.2 Compósitos cimentícios produzidos com agregado reciclado.....	31
3.2.1 Propriedades no estado fresco.....	32
3.2.2 Calor de hidratação .....	33
3.2.3 Propriedades físicas no estado endurecido .....	35
3.2.4 Propriedades mecânicas no estado endurecido .....	36
3.2.5 Durabilidade .....	38
3.2.6 <i>Retração</i> .....	39
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>42</b>
4.1 Materiais .....	43
4.1.1 Cimento Portland.....	43
4.1.2 Agregados miúdos .....	44
4.1.3 Aditivo superplastificante.....	50
4.1.4 Água.....	51
4.2 Preparo dos materiais .....	51
4.3 Moldagem dos compósitos cimentícios .....	51

4.4 Ensaio de caracterização do estado fresco .....	55
4.4.1 Flow Table.....	55
4.4.2 Teor de ar incorporado .....	56
4.4.3 Calor de hidratação .....	57
4.5 Ensaio de caracterização do estado endurecido .....	59
4.5.1 Absorção por capilaridade.....	59
4.5.2 Absorção por imersão .....	61
4.5.3 Índice de vazios e massas específicas.....	63
4.5.4 Resistência à tração na flexão.....	63
4.5.5 Resistência à compressão .....	65
4.5.6 Profundidade de carbonatação.....	66
4.5.7 Retração por secagem .....	67
4.5.8 Retração autógena.....	69
4.6 Análise e correlação dos resultados.....	70
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
5.1 Análise dos agregados convencionais e reciclados.....	71
5.1.1 Absorção de água .....	71
5.1.2 Material pulverulento .....	72
5.1.3 Granulometria .....	73
5.1.4 Densidade na condição seca e saturada.....	74
5.1.5 Composição do agregado reciclado .....	75
5.2 Propriedades no estado fresco dos compósitos cimentícios.....	76
5.2.1 Consistência das argamassas.....	76
5.2.2 Teor de ar incorporado e densidade no estado fresco.....	77
5.2.3 Calorimetria.....	78
5.3 Propriedades físicas dos compósitos cimentícios.....	82
5.3.1 Absorção por capilaridade e imersão .....	83
5.3.2 Índice de vazios e massa específica .....	89

5.4 Resistência mecânica dos compósitos cimentícios .....	93
5.4.1 Resistência à tração .....	93
5.4.2 Resistência à compressão .....	97
5.5 Carbonatação dos compósitos cimentícios .....	104
5.6 Retração dos compósitos cimentícios .....	112
5.6.1 Retração por secagem .....	112
5.6.2 Retração autógena .....	121
5.7 Análise geral dos resultados .....	129
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>144</b>
<b>APÊNDICE B .....</b>	<b>149</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos setores mais importantes da economia brasileira, a construção civil, movimentou mais de 500 bilhões de reais e empregou mais de 2,3 milhões de pessoas em 2021 (CBIC, 2021). Em contrapartida, nesse mesmo ano, quase 47 milhões de toneladas de resíduo de construção e demolição (RCD) foram gerados pelos municípios brasileiros, o que representa aproximadamente 40% de todo resíduo coletado nos centros urbanos (ABRELPE, 2022).

A disposição desse material, que em grande parte é inerte, geralmente ocorre em aterros sanitários, o que leva à diminuição da vida útil e capacidade de despejo dessas estruturas. Além desse problema, tem-se o crescente aumento de consumo de recursos minerais não renováveis, como areia e brita. Segundo ANEPAC (2022), foram produzidas 385 milhões de toneladas de areia e 275 milhões de brita somente em 2021, o que representou um aumento de quase 9% em relação ao ano anterior.

Para a realidade do município de Belo Horizonte (MG), uma típica capital brasileira, estima-se que 90% de todo RCD é composto por resíduos que poderiam ser reaproveitados como agregado reciclado (classe A). Com isso, haveria uma diminuição do consumo de recursos não renováveis e aumento da sustentabilidade do setor (CONAMA, 2002; SCRIVENER, 2018; BESSA *et al.*, 2019).

Com a revisão da NBR 15116 (ABNT, 2021) no segundo semestre de 2021, a utilização dos agregados reciclados passou a ser permitida para execução de obras de pavimentação e de concretos e argamassas com e sem finalidade estrutural. Entretanto, o que se percebe na prática é que apenas 16% desse resíduo é, de fato, reciclado e reaproveitado na construção civil (ABRECON, 2021). Nesse ponto, o Brasil se encontra muito atrás de diversos países europeus, como, por exemplo, Itália, Reino Unido e Países Baixos, onde o percentual de reciclagem do resíduo de construção e demolição é superior a 90% (ZHANG *et al.*, 2021).

Estudos desenvolvidos por diversos pesquisadores conseguiram produzir os mais variados tipos de concreto, desde os convencionais a autoadensáveis, além de

concretos com elevadas resistências, com a utilização de agregado reciclado (AKHTAR e SARMAH, 2018; GUO *et al.*, 2018). O percentual de substituição pode variar de 10% até 100% em relação ao volume de fração miúda, graúda ou de ambas. Apesar de ser usualmente observada uma perda de resistência mecânica, a incorporação desse material ainda se mostra viável do ponto de vista técnico (NEDELJKOVIĆ, 2021). Pesquisas vem sendo realizadas na utilização conjunta dos agregados reciclados com aditivos plastificantes e materiais cimentícios suplementares de forma a minimizar os efeitos da redução nas propriedades mecânicas (BRITO *et al.*, 2016; KISKU *et al.*, 2017; BRAVO *et al.*, 2018; CHEN *et al.*, 2019).

Atualmente, existem diversos estudos que utilizam o RCD como agregado graúdo (ZHOU e CHEN, 2017; DATTA *et al.*, 2022). Porém, investigações acerca da aplicabilidade de agregado miúdo reciclado ainda são limitadas. Ulsen *et al.* (2021) pontuam que o agregado graúdo reciclado tem sido mais estudado por ter uma simples reintrodução no mercado e, nesse contexto, os poucos autores que avaliaram o uso da porção fina reciclada em concreto sugerem sua inadequação. Isso devido à alta absorção de água e à existência de possíveis contaminantes, como vidro, madeira e gesso. Entretanto, essa questão ainda se mostra inconclusiva, abrindo possibilidades para uso também do agregado miúdo reciclado em argamassas e concretos.

De maneira geral, os compósitos cimentícios são altamente susceptíveis a processos de retração, levando à formação de microfissuras e reduzindo a vida útil do material. Uma forma de minimizar seus efeitos é através de um adequado processo de cura. Essa atividade, na maioria das vezes, é realizada por métodos ativos, como aspersão de água na estrutura recém-concretada. Como alternativa, vem-se estudando novos materiais capazes de absorver parte da água de amassamento e liberá-la lentamente durante o endurecimento do concreto para controle das reações de hidratação. Esse fenômeno é conhecido como cura interna (NEVILLE, 2016; PEDRO *et al.* 2017; EL-HAWARY e AL-SULILY, 2020).

Nesse contexto, os agregados reciclados, com altos níveis de porosidade e capacidade de absorção de água, apresentam potencial aplicação como agentes promotores de cura interna. Poucos trabalhos se dedicaram a avaliar os impactos da incorporação dos agregados reciclados na retração de compósitos cimentícios, seja ela por secagem, plástica ou autógena (WU *et al.*, 2017; BRAVO *et al.*, 2018). Entretanto, o entendimento dos mecanismos e processos dessa aplicação ainda é inconclusivo e deficiente. Esse entendimento se torna ainda mais necessário quando cimentos compostos são utilizados, como, por exemplo, a escória de alto forno (LOTHENBACH, 2011). Sabe-se que materiais cimentícios suplementares demandam um maior tempo para reação, e a disponibilidade de água por um maior período é uma questão chave para o desempenho do material (SKIBSTED e SNELLINGS, 2019).

Portanto, o presente trabalho busca avançar no entendimento dos efeitos da substituição do agregado miúdo natural pelo RCD na hidratação e retração de compósitos cimentícios. Com isso, espera-se contribuir para a compreensão da capacidade desse material reciclado em promover a cura interna, sobretudo na utilização de cimentos compostos.

## **1.1 Justificativa**

Devido à escassez de área disponível para construção de novos edifícios, é cada vez mais comum em grandes cidades a demolição de prédios antigos para construção de novos. Esse movimento aumenta a geração de resíduos de construção e demolição e sobrecarrega os aterros sanitários com materiais inertes que poderiam ser reutilizados.

A utilização do agregado reciclado pelo próprio setor da construção civil é uma forma de promover sustentabilidade além de auxiliar na problemática da disposição desse material. A maior parte dos estudos existentes concentra-se em agregados reciclados produzidos de concreto, em especial a fração graúda. Por esse motivo há uma lacuna de conhecimento relativo à utilização do agregado na fração miúda, em especial aquele produzido de diversos materiais (agregado reciclado misto).

Com o objetivo de contribuir com a literatura o trabalho avaliou a viabilidade da utilização do agregado reciclado misto, na fração miúda, na produção de compósitos cimentícios, bem como apontar a capacidade desse material como agente promover cura interna.

## **1.2 Estrutura do trabalho**

Esse trabalho está organizado em seis capítulos. O presente capítulo dedicou-se a fazer uma breve introdução sobre o tema, trazendo informações sobre a relevância dessa pesquisa.

O segundo capítulo se dedicou a trazer o objetivo geral desse estudo, e os objetivos específicos traçados para se alcançar essa meta.

No terceiro capítulo foi realizado uma revisão bibliográfica sobre o tema, onde foram apresentadas as principais diferenças entre os agregados reciclados naturais e reciclados, e como a presença do agregado reciclado afeta as propriedades dos compósitos cimentícios.

No quarto capítulo foi descrito os materiais utilizados, quais traços foram investigados, além de trazer a metodologia adotada dos ensaios de caracterização dos agregados e dos compósitos cimentícios estudados.

No quinto capítulo foi realizado a discussão dos resultados obtidos, tanto para os agregados quanto para as argamassas. Nesse capítulo também foi realizado a comparação entre as diversas propriedades avaliadas e com essas propriedades se relacionam entre si.

O sexto e último capítulo se dedicou a fazer um fechamento da pesquisa, trazendo os principais resultados encontrados e as conclusões tiradas sobre a utilização do agregado reciclado em compósitos cimentícios.

## 2 OBJETIVO

Essa pesquisa tem como objetivo geral avaliar o uso de agregado reciclado miúdo como forma de promoção de cura interna em compósitos cimentícios.

Para isso, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar comparativamente as propriedades físicas do agregado miúdo reciclado com o agregado convencional (areia natural), no que tange a absorção de água, teor de material pulverulento, densidade e granulometria;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de agregados reciclados nas propriedades do estado fresco de compósitos cimentícios com diferentes tipos de cimento, referente a consistência, teor de ar incorporado, densidade no estado fresco, e calor de hidratação;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de agregados reciclados nas propriedades físicas, mecânicas e durabilidade de compósitos cimentícios com diferentes tipos de cimento; relativo à absorção de água, resistência a tração, resistência a compressão, e carbonatação;
- Avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de agregados reciclados nos processos de retração por secagem e autógena de compósitos cimentícios com diferentes tipos de cimento.

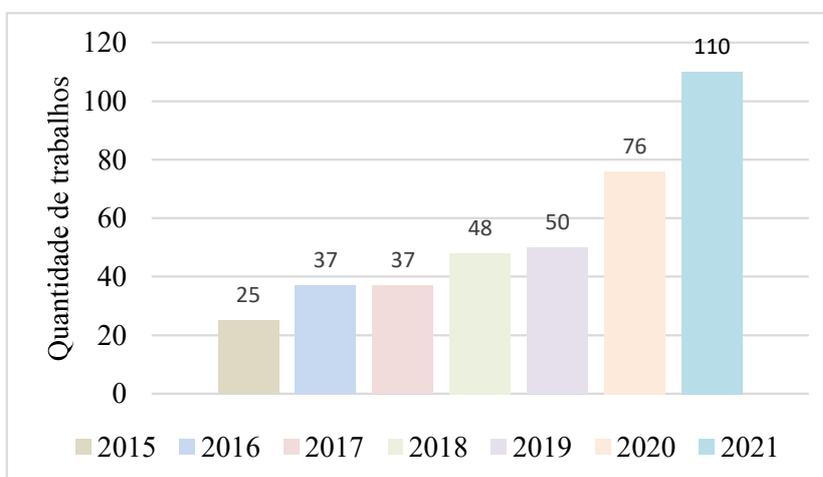
### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo é apresentado o estado-da-arte dos agregados reciclados e a influência da sua incorporação nas matrizes cimentícias, mostrando os efeitos nas propriedades no estado fresco, endurecido, e na durabilidade.

Para isso, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, por meio de artigos acadêmicos, revisados por pares, hospedados nas bases de dados da *ScienceDirect (Elsevier)* e Google Acadêmico. A primeira foi escolhida porque essa abrangia artigos de maior relevância e impacto da área, observados durante pesquisas realizadas no portal Capes. Já a segunda, foi em virtude de seu amplo alcance na busca de textos técnicos e acadêmicos.

Como premissa para seleção dos trabalhos, foram escolhidos artigos publicados entre os anos de 2015 e 2021, na língua inglesa ou portuguesa, utilizando as seguintes palavras-chaves: “*recycled concrete aggregate*”, “*durability*” e “*shrinkage*”. Essas palavras-chaves foram escolhidas entre uma série de combinações por apresentarem o maior retorno no que tange número publicações. Conforme a Figura 1, observa-se um aumento significativo no número de publicações sobre essa temática nos últimos anos. Isso se justifica pela crescente necessidade de uma melhor destinação dos resíduos e a promoção de técnicas sustentáveis no setor da construção.

**Figura 1:** Evolução das publicações entre 2015 e 2021 de trabalhos acadêmicos com as palavras chaves “*recycled concrete aggregate*”, “*durability*” e “*shrinkage*”.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro passo para seleção dos trabalhos foi realizar a leitura dos títulos. Os títulos que não estavam em consonância com os objetivos desta dissertação foram excluídos. Em seguida, os artigos foram organizados em ordem decrescente pelo número de citações. Para verificar o número de citações utilizou-se a plataforma do Google Acadêmico. Logo após, foram lidos os resumos dos trabalhos que representaram 80% das citações e excluídos aqueles sem aderência com o escopo do trabalho. Na Tabela 1 encontra-se o número de artigos após cada uma dessas etapas.

**Tabela 1:** Número de artigos após cada etapa revisão sistemática da literatura.

Palavras-chave	Nº Artigos encontrados inicialmente	Nº Artigos após leitura do título	Nº Artigos após a leitura do resumo	Nº Artigos após a leitura integral
“recycled concrete aggregate”, “durability” e “shrinkage”	383	257	108	47

Fonte: Elaborado pelo autor.

Encontra-se no Apêndice A informações complementares aos artigos utilizados nesse trabalho. Dentre os artigos utilizados para realizar a revisão bibliográfica, destacam-se os trabalhos de Shi *et. al* (2016), Akhtar e Sarmah (2018), Guo *et. al* (2018), Scrivener *et. al* (2018) e Tam *et. al* 2018 que apresentaram mais de 600 citações cada.

### 3.1 Agregado Reciclado

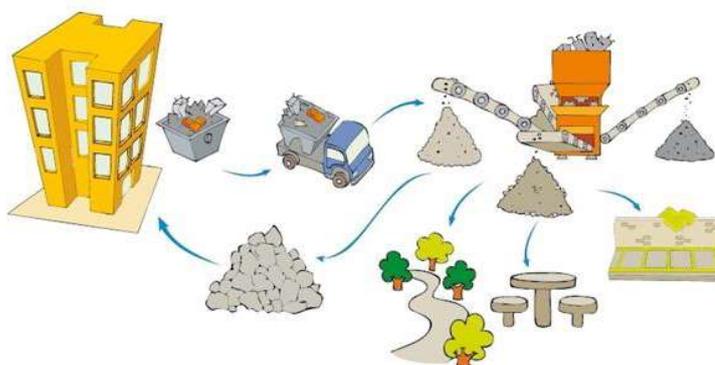
Segundo a resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), os resíduos de construção e demolição (RCD) é todo aquele material proveniente de construção, reformas, reparo e demolição. Ainda segundo essa mesma resolução, os resíduos são classificados em quatro classes (A, B, C e D).

De acordo com a NBR 15116 (ABNT, 2021) os resíduos de construção civil que podem ser reciclados ou reutilizados como agregado são aqueles pertencentes a classe A derivados de tijolos, argamassa, concreto entre outros. Ainda segundo a referida norma, os agregados reciclados são divididos em três grandes grupos: agregado reciclado de concreto (ARCO), agregado reciclado cimentício (ARCI) e agregado de resíduo misto (ARM), podendo serem utilizados na fração graúda e miúda.

A diferença entre esses três grupos está na matéria-prima utilizada para sua produção. Para os ARCO's é usado, majoritariamente, resíduos oriundos de concreto, enquanto para produção do ARCI's, aproveita-se restos de argamassa, blocos de concreto, pequenos percentuais de material cerâmico e concreto. Por último, o ARM é o agregado produzido com a mistura de materiais cimentícios e cerâmicos, estando presente peças pré-moldadas, telhas cerâmicas, argamassas, blocos e restos de concreto (ABNT, 2021).

Similar ao modo de obtenção dos agregados naturais, a Figura 2 demonstra uma representação esquemática do modo de obtenção de agregados reciclados e seu ciclo de vida. A matéria-prima para produção do agregado reciclado é composta por materiais da estrutura de concreto, argamassas, tijolos, calçamentos, entre outros elementos. Esses materiais são levados para usina de reciclagem, onde são triturados até que se atinja a granulometria de interesse e posteriormente são reutilizados para confecção de novos elementos. Em alguns casos, buscando uma melhoria nas características do agregado reciclado, os mesmos podem passar por um processo de dupla ou até mesmo tripla moagem (BRITO *et al.*, 2016). Fatos esses que foram observados por Adams *et al.* (2016), Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Pickel, *et al.* (2017) e Bravo *et al.* (2017). Em seus trabalhos, foram avaliados agregados reciclados de várias origens e identificados que as propriedades físicas desses materiais (como a densidade e absorção de água) variavam cerca de 20% entre das amostras de diferentes tipos de ARCO.

**Figura 2:** Ciclo de vida e processo de produção dos agregados reciclados.

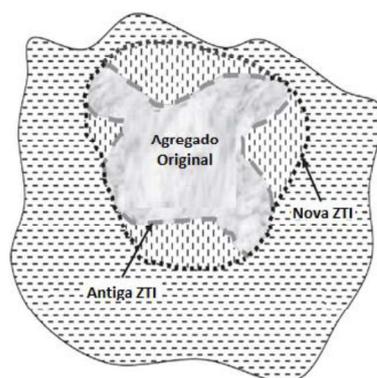


Fonte: Usifort Ambiental, 2022.

Em função do seu processo de fabricação e das matérias-primas utilizadas, observa-se elevada heterogeneidade nas propriedades químicas e mecânicas dos mais diversos tipos de agregados reciclados.

Para Kisku *et al.* (2017) a principal diferença entre os agregados naturais e os reciclados é a presença de pasta/argamassa aderida nas superfícies do agregado. Em virtude disso, nos compósitos cimentícios produzidos com agregados reciclados, verifica-se a ocorrência de uma dupla zona de transição. A primeira refere-se à região entre a agregado natural e a pasta/argamassa presente no agregado reciclado, e a segunda entre o agregado reciclado e a nova matriz. A Figura 3 representa esquematicamente esse fato.

**Figura 3:** Representação esquemática da dupla zona de transição interfacial (ZTI) existentes entre o agregado reciclado e a nova matriz cimentícia.



Fonte: Adaptado de Kisku et al. (2017)

Nos próximos tópicos são apresentadas análises comparativas entre algumas propriedades dos agregados reciclados e os agregados naturais.

### 3.1.1 Densidade

A densidade, ou massa específica, é a relação entre a massa do material e o seu volume. Podendo essa propriedade ser medida de várias maneiras. A NBR 9935 (ABNT, 2011) faz distinção dos seguintes tipos: densidade real de partículas na condição seca, densidade de partículas na condição seca, densidade de partículas na

condição saturada superfície seca, densidade aparente do agregado, densidade aparente do agregado seco e solto e densidade aparente do agregado seco e compactado.

Yildirim *et al.* (2015) ao caracterizar os agregados reciclados identificaram que a massa específica desse material é inferior aos agregados naturais. Da mesma forma, Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) verificaram que quanto menor a resistência mecânica e maior a quantidade de tijolos cerâmicos do resíduo utilizado para produção do agregado, menor é sua densidade.

Em seus estudos, mesmo com a utilização de concretos com resistências de 74 MPa para produção dos ARCO, Pedro *et al.* (2017) identificaram uma queda da densidade do agregado reciclado graúdo. Um efeito similar foi observado por Aslani *et al.* (2018) que utilizou tanto os agregados reciclados miúdo, quanto graúdo.

O que se observa na literatura é que, de modo geral, o agregado reciclado tem uma densidade inferior ao natural. Os pesquisadores argumentam que essa diminuição na densidade ocorre em virtude da maior porosidade conferida pela argamassa aderida ao agregado (PEDRO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2021).

### 3.1.2 Absorção de água

Para a NBR 9935 (ABNT, 2011), a absorção de água é a propriedade do agregado relacionado com o aumento da massa devido ao preenchimento de seus poros e vazios com água. Essa propriedade é expressa em termos percentuais da massa seca do agregado. O que se observa na literatura é que os agregados reciclados apresentam uma maior capacidade de absorção que os agregados naturais, seja por capilaridade, ou imersão. Isso acontece porque esse material é mais poroso e mais permeável (ADAMS *et al.*, 2016; PEDRO *et al.*, 2017; BRAVO *et al.*, 2018).

Medjigbodo *et al.* (2018) comentam que essa é uma das propriedades mais divergentes entre o agregado natural e o reciclado, sendo que o agregado reciclado chega a ser três vezes mais absorvente que o agregado natural. Esse aumento da

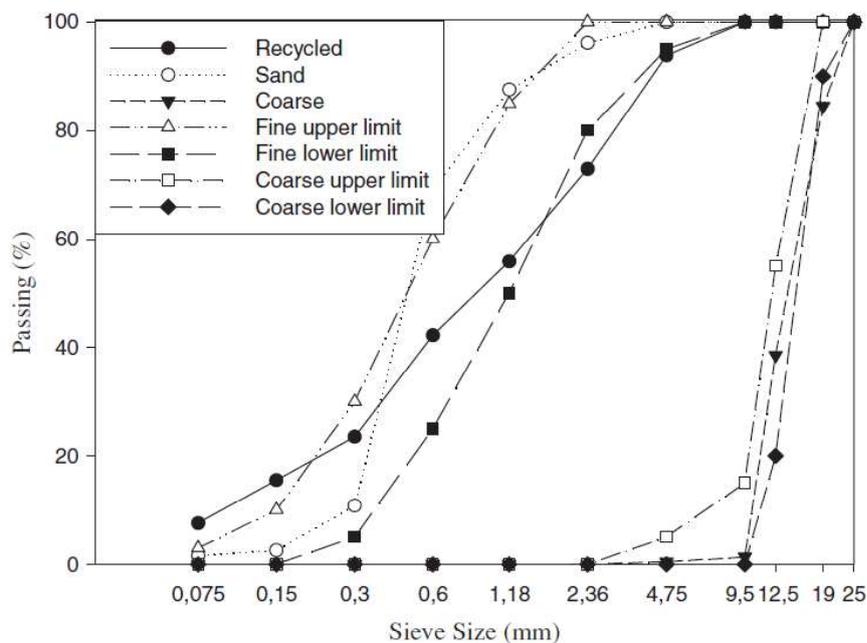
absorção da água vem sendo atribuído pelos pesquisadores a elevada interconectividade e porosidade, quando comparada com os agregados naturais (ADAMS *et al.*, 2016; PEDRO *et al.*, 2017; BRAVO *et al.*, 2018).

### 3.1.3 Granulometria

Relativo à granulometria dos agregados reciclados, frequentemente se observa um índice de forma superiores que os agregados naturais, o que indica uma maior diferença entre o comprimento e a espessura das partículas. Devido ao seu processo de fabricação esse material usualmente apresenta grãos com geométricas mais irregulares (BRITO *et al.*, 2016 e SILVA *et al.*, 2021).

Quanto a distribuição granulométrica, nota-se que é possível controlá-la em virtude dos tipos e da quantidade de rompedores e o número de vezes que o material é submetido pelo processo de britagem.

**Figura 4:** Curva granulométrica do agregado, com representação da zona de utilização.



Fonte: YILDIRIM; MEYER e HERFELLNER; 2015.

Um exemplo de curva granulométrica dos agregados reciclados pode ser visualizado na Figura 4 (YILDIRIM *et al.*, 2015; MEDJIGBODO *et al.*, 2018, NEDELJKOVIĆ *et al.*,

2021). Assim, é possível observar que o agregado reciclado, mesmo que apresente uma distribuição ligeiramente diferente do agregado natural, ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos para ser utilizado como agregado miúdo.

### 3.1.4 Composição química

Buscando uma melhor compreensão dos agregados reciclados, Gomes *et al.* (2015), Sicakova *et al.* (2017) e Jesus *et al.* (2019) realizam a caracterização por fluorescência de raio X (FRX) desses materiais. A Tabela 2 apresenta de forma resumida os principais óxidos presente nas amostras.

**Tabela 2:** Caracterização química dos agregados reciclados oriundos de diversas fontes.

Óxidos	Gomes et al. (2015)	Sicakova et. (2017)		Jesus et al. (2019)	
	Concreto	Concreto	Tijolo	Concreto	Misto
SiO <sub>2</sub>	56,50	53,90	73,00	39,71	55,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,67	6,40	15,40	3,59	3,90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,42	2,80	4,30	1,01	2,12
CaO	20,70	28,40	1,60	52,52	26,42
Outros	7,710	8,50	5,70	3,17	12,29

Fonte: Adaptado pelo próprio Autor

Pode-se observar que, apesar de suas diferenças, os agregados reciclados de concreto e agregados reciclados mistos são compostos majoritariamente pelos óxidos: SiO<sub>2</sub>, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. A maior quantidade de alumina se nota nas amostras de tijolos, os quais são comumente produzidos a partir de argilominerais ricos em silicatos de alumínio hidratados. Em contrapartida, os principais produtos de hidratação de compostos cimentícios são silicatos hidratados de cálcio e hidróxido de cálcio.

## 3.2 Compósitos cimentícios produzidos com agregado reciclado

Os compósitos cimentícios produzidos com agregados reciclados são aqueles onde parte dos agregados naturais, seja a fração miúda ou graúda, é substituída total ou parcialmente pelo agregado reciclado. Essa substituição é usualmente feita em volume, dado a diferença entre a densidade dos agregados naturais e os reciclados. Os percentuais de substituição vão de 10% até 100%, seja da fração graúda, miúda

ou de ambas (SOUCHEA *et al.*, 2017; BRAVO *et al.*, 2017; EL-HAWARY e AL-SULILY, 2020). Entretanto, somente para fins estruturais, a NBR 15116 (ABNT, 2021) especifica que o uso de agregados reciclados de concreto (ARCO) deve ser limitado a 20% da massa de agregados totais e a estruturas com classes de agressividade fraca e moderada.

Nos próximos tópicos são discutidas algumas características e propriedades dos compósitos cimentícios no estado fresco, endurecido e de durabilidade, em especial a retração.

### 3.2.1 *Propriedades no estado fresco*

A propriedade do estado fresco mais estudada para os compósitos cimentícios é a consistência. Essa propriedade é medida usualmente pelo abatimento de tronco de cone para concretos, que no Brasil é normatizado pela NBR 10342 (ABNT, 2012). Para Kisku *et al.* (2017), o tamanho, a umidade, a forma e a textura dos agregados são fatores que tem grande influência nessa propriedade.

Em geral, a presença dos agregados reciclados promove uma redução dessa propriedade, e que há uma relação quase que linear entre o teor de substituição e a queda de trabalhabilidade. Essa diminuição da consistência pode ser compensada pelo acréscimo de água na mistura ou utilizando aditivos superplastificantes (ASLANI *et al.*, 2018; AGHABAGLOU *et al.* 2019).

Para os concretos que são produzidos apenas com o agregado reciclado graúdo o impacto dessa redução é menor quando comparada com aqueles em que a fração substituída é a miúda. As pesquisas apontam que essa redução da trabalhabilidade está associada com a elevada absorção de água do agregado reciclado (PEDRO *et al.*, 2017; BRAVO *et al.*, 2018).

Outra forma de compensar esse efeito, é a adoção da pré-saturação do agregado ou a compensação da água pelo cálculo da relação água/cimento efetivo. Segundo a

NBR 15116 (ANBT, 2021) o cálculo da relação água/cimento efetivo é feito pelas Equações 1 e 2.

$$a/C_e = C_{ae}/C_c \quad \text{Eq.1}$$

$$C_{ae} = C_{at} - (C_{ag} \times A \times K_1) - (C_{am} \times A \times K_1) \quad \text{Eq.2}$$

Onde,

$C_{ae}$  é a quantidade de água efetiva (em kg),

$C_c$  o consumo de cimento por m<sup>3</sup> de concreto (em kg/m<sup>3</sup>),

$A$  é absorção do agregado (em %),

$K_1$  é fração de água absorvida nas primeiras 24h pelo agregado,

$C_{ag}$  quantidade de agregado reciclado graúdo, por m<sup>3</sup> de concreto (em kg),

$C_{am}$  quantidade de agregado reciclado miúdo, por m<sup>3</sup> de concreto (em kg).

Entretanto, no trabalho de Jesus *et al.* (2019), onde foram realizadas substituição de até 20% da fração miúda, utilizando agregados reciclados com diâmetro inferior a 200 µm, observou um aumento na consistência. Os pesquisadores justificaram que o efeito filler promovido pela fração fina compensou a necessidade de acréscimo de água.

### 3.2.2 Calor de hidratação

Ao entrarem em contato com a água, os silicatos e os aluminatos, constituintes do cimento, iniciam as reações de hidratação. Conseqüentemente, isso garante que o cimento mude sua forma de pó à uma massa sólida, promovendo um ganho de resistência mecânica (NEVILLE, 2016).

O processo de hidratação do cimento é oriundo de uma reação exotérmica, ou seja, ocorre liberação de calor. De acordo com a NBR 12006 (ABNT, 2020), o calor de hidratação do cimento é entendido como sendo a quantidade de calor liberada durante sua hidratação dividido pela massa de cimento.

Bauer (2013) mediu a quantidade de calor liberado pelas principais fases do cimento, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 3:** Calor liberado pelas principais fases do cimento

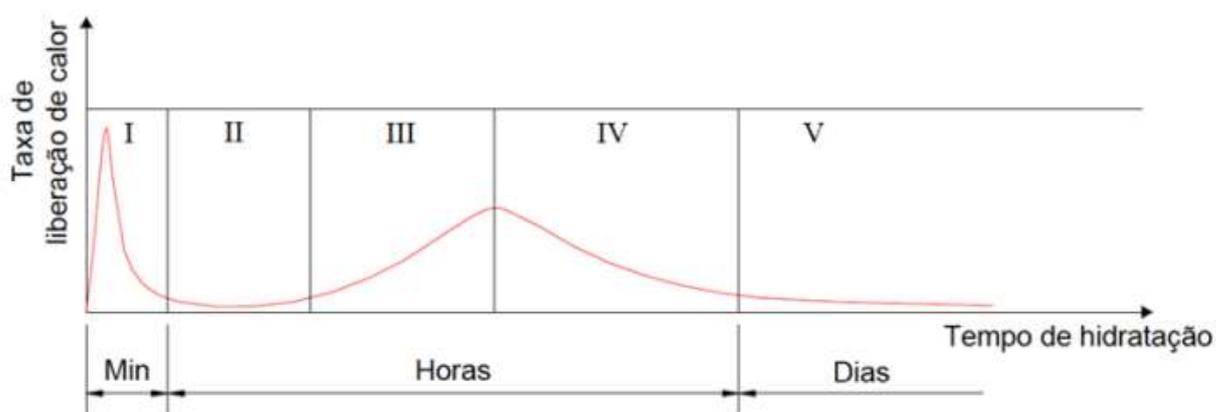
<b>Composto</b>	<b>Calor liberado (J/g)</b>
C <sub>3</sub> S	502
C <sub>2</sub> S	259
C <sub>3</sub> A	866
C <sub>4</sub> AF	849
C	1167

Fonte: Bauer, 2013.

De acordo com Neville (2016), 50% do calor de hidratação é liberado nos primeiros 3 dias. Aos 7 dias já foram liberados cerca de 75%; somente após 6 meses chega-se a 90% do calor de hidratação dissipado. Fusco (2008) relata que nas primeiras idades a liberação de calor é mais intensa, sendo que nessa idade a massa de cimento ainda possui baixa rigidez e é facilmente expandida pelo aumento da temperatura. Ainda segundo este autor, como o núcleo do elemento de concreto está com uma temperatura superior, quando comparado com as regiões periféricas, surgem esforços de tração que geram fissuração generalizada.

Jawed *et al.* (1983) descrevem que a hidratação do cimento Portland é dividida em cinco etapas (Figura 5), sendo elas: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e estágio final (V).

**Figura 5:** Etapas de hidratação de pastas de cimento Portland



Fonte: AGOSTINHO *et al.* (2020).

O estágio inicial (etapa I) é relacionado com a molhagem das partículas de cimento e o início da pega. No período de indução (etapa II) é conhecida como dormência e varia de 30 min a 3 h, dependendo do tipo de cimento e da relação água/cimento ( $a/c$ ). Na terceira etapa, período de aceleração, é quando ocorre a formação do C-S-H e do  $\text{Ca(OH)}_2$  acontece de forma mais acelerada. Durante essa fase é que acontece o fenômeno de pega, os silicatos, especialmente o C3S se hidratam rapidamente e atingem a máxima taxa de hidratação. Esta etapa finaliza como o aparecimento do segundo pico na curva dando início a próxima etapa. O período de desaceleração (etapa IV), há uma redução na taxa do calor, sendo que após um período de 24 h tem-se o início das reações lentas. Por último, no estágio final (etapa V) praticamente todo o calor já foi liberado, mas ainda ocorrem reações de hidratação. Nesse momento os produtos da hidratação preenchem gradativamente os espaços vazios na pasta densificando o material (TAYLOR, 1998).

### 3.2.3 Propriedades físicas no estado endurecido

Como os agregados reciclados possuem características físicas distintas dos agregados naturais, espera-se que a sua substituição influencie as propriedades dos compósitos cimentícios, fato esse relatado por Kisku *et al.* (2017) e Mao *et al.* (2021). A incorporação do agregado reciclado alterou a densidade, porosidade e absorção de água dos compósitos cimentícios.

Bravo *et al.* (2017) identificaram que a presença do agregado reciclado promoveu um aumento significativo, na ordem de 56%, da absorção de água no concreto, seja por capilaridade ou por imersão. Esse aumento também foi observado por Souchea *et al.* (2017), que associou esse acréscimo na absorção do concreto ao fato do agregado reciclado ser mais absorvente que o agregado natural.

Já Silva *et al.* (2021) pontua que esse aumento na absorção está relacionado diretamente com a argamassa aderida no agregado e que quanto maior a quantidade da substituição realizada, maior será a capacidade absorvente do concreto.

Outra propriedade amplamente investigada é a porosidade. Através de ensaio de intrusão de mercúrio, Gonzalez-Corominas e Etxeberri (2016), verificaram que a presença do agregado reciclado promoveu um aumento na porosidade de 33%. Além disso, observou um aumento de 21% do diâmetro médio dos poros, saindo de 0,033  $\mu\text{m}$  na amostra de referência para 0,040  $\mu\text{m}$  na amostra com agregado reciclado no tamanho dos poros observados. Os resultados de He *et al.* (2020) também corroboram para essa afirmação.

#### 3.2.4 Propriedades mecânicas no estado endurecido

Para Kisku *et al.* (2017) a resistência à compressão é a característica mais marcante dos compósitos cimentícios, sendo ela diretamente relacionada com a durabilidade e a performance desse material. Para compósitos produzidos com agregado reciclado, a qualidade do agregado, quantidade de argamassa aderida, quantidade de água utilizada, e método de mistura têm grande impacto nessa propriedade. A resistência a tração também pode ser influenciada pelos mesmos fatores. Geralmente, essa propriedade é medida de forma indireta, sendo o ensaio mais popular à resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222, 2011) ou por flexão (ABNT NBR 12142, 2010).

Vem sendo observado na literatura que os valores de resistência a compressão dos concretos produzidos com agregado reciclado tendem a ser inferiores à resistência do concreto utilizando apenas agregado natural. Também se observa, que quanto maior o percentual da substituição, maior será a diminuição da resistência. (NEDELJKOVIĆ *et al.*, 2021)

Brito *et al.* (2016) avaliaram o desempenho de concretos produzidos com substituição de 25% a 100% do agregado natural pelo agregado reciclado graúdo, sendo feita correção do fator  $a/c$  em virtude da presença do agregado reciclado. Também fez parte desse trabalho a avaliação de uma amostra com substituição de resíduo onde não foi utilizado a correção do fator  $a/c$  e sim a utilização de aditivo superplastificante no teor de 1%. Os autores encontram que a presença do agregado reciclado promoveu uma diminuição na resistência à compressão e tração. Essa perda foi

associada por eles devido a necessidade do acréscimo de água para garantir a trabalhabilidade. Vale mencionar, que para amostras com aditivo (sem água adicional), mesmo com teor de substituição de 100% houve melhora na resistência mecânica. Resultados similares foram encontrados Kisku *et al.* (2017) e Pacheco *et al.* (2019).

Para Vinay *et al.* (2018) as propriedades dos concretos contendo agregado reciclado estão diretamente relacionadas com a qualidade do agregado utilizado. Para esses autores, os impactos negativos desse material podem ser minimizados pela utilização de materiais cimentícios suplementares (por exemplo, sílica ativa), em conjunto com aditivos superplastificantes, ou mesmo com a realização da saturação dos agregados antes da produção do concreto.

Vinay *et al.* (2018) também avaliaram a produção de concretos contendo sílica ativa, onde foram substituídos os agregados naturais (miúdo e graúdo) por agregados reciclados, em conjunto com aditivos superplastificantes. Os resultados de resistência à compressão e à tração indicaram que as amostras contendo o resíduo são ligeiramente inferiores à de referência, apenas 3%. Essa estratégia de utilização de adições minerais também foi investigada por Aslani *et al.* (2018) e Aghabaglou *et al.* (2019), sendo obtido resultados similares.

Ao avaliar a substituição isolada da fração miúda e da graúda, Pedro *et al.* (2017) constataram que as variações na resistência mecânica são mais afetadas quando a fração miúda é substituída. De forma análoga ao que se observa na resistência à compressão e tração, o módulo de elasticidade também sofre impacto em virtude da substituição dos agregados naturais. Pacheco *et al.* (2019) encontraram diminuições significativas, na ordem de 20%. Essa diminuição era esperada, uma vez que o módulo de elasticidade está intimamente ligado com as propriedades dos materiais constituintes do concreto. A diminuição no módulo de elasticidade também foi identificada por Pedro *et al.* (2017) e Aghabaglou *et al.* (2019). Os autores informam que porosidade do agregado em conjunto com a necessita do acréscimo de água de amassamento são os principais fatores responsáveis pela diminuição do módulo de elasticidade.

Apesar da diminuição da resistência mecânica do concreto, Brito *et al.* (2016) e Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) pontuam que as amostras contendo ARCO apresentaram maior ganho percentual de resistência com o passar do tempo. Os resultados obtidos por Adams *et al.* (2016) mostram que para as amostras com idade superior a 90 dias, os resultados obtidos são estatisticamente similares a concretos com agregados naturais. Segundo os autores, uma possível explicação para esses fatos é uma melhora da zona de transição e a capacidade do agregado reciclado servir como material promotor de cura interna. Dessa forma, o agregado reciclado poroso pode funcionar como um reservatório de água que servirá, por um período prolongado, para os processos de hidratação da matriz cimentícia.

### 3.2.5 Durabilidade

A durabilidade de compósitos cimentícios, como concreto e argamassa, pode ser entendida como a habilidade do material em suportar ações externas, sejam elas de origem física ou química. Essa propriedade é diretamente influenciada pelos materiais constituintes e das condições de cura. Sua caracterização usualmente é feita pela capacidade do material em resistir à penetração de cloretos, sulfatos e a carbonatação. Também faz parte da caracterização da durabilidade o comportamento desse material frente às deformações volumétricas da matriz cimentícia (KISKU *et al.*, 2017).

Além das propriedades mecânicas, outro aspecto muito relevante para o concreto é a sua vida útil. A busca por estruturas mais duráveis é uma preocupação recorrente na literatura, uma vez que é possível reduzir gastos com reparos, além de promover a sustentabilidade no setor da construção. (KISKU *et al.*, 2017)

Brito *et al.* (2016) investigaram o efeito da substituição do agregado natural pelo agregado reciclado em teores de 25% e 100%. Os corpos de prova foram submetidos à carbonatação acelerada durante 91 dias. Verificou-se que a presença dos agregados reciclados aumentou a frente carbonatada, e que esse aumento foi proporcional ao teor da substituição.

Pedro *et al.* (2017) também avaliaram o efeito da carbonatação e chegou em resultados similares. Entretanto esses autores destacaram que, apesar da frente carbonata ser maior que a da amostra referência, em termos absolutos, esse aumento é relativamente pequeno, podendo ainda classificar o concreto como de bom desempenho.

Em relação à resistência dos concretos com agregado reciclado frente a ataques de cloretos, Bravo *et al.* (2018) observaram que assim como ocorre na carbonatação, concretos com agregado reciclado apresentam menor resistência a cloretos. Segundo esses autores, essa perda de resistência está associada às microfissuras existentes no agregado e à sua porosidade. Aghabaglou *et al.* (2019) também identificaram que concretos com ARC são menos resistentes à penetração de cloretos pelo fato do concreto se tornar mais absorvente.

Silva *et al.* (2021) avaliaram o desempenho de agregados reciclados submetidos a vários processos de reciclagem. Segundo os autores, quanto maior o número de processos de reciclagem, pior é o desempenho do concreto. Entretanto, os autores ainda mencionam que parece haver uma tendência, onde a partir de um certo número de ciclos de reciclagem, as propriedades se mantêm constantes.

### 3.2.6 Retração

A deformação volumétrica está diretamente relacionada com a durabilidade do concreto, pois essa acontece concomitantemente com o surgimento de fissuras, quando restringida. Isso pode ser definido a partir de processos relacionados à retração do material. Esse fenômeno ocorre devido à retirada, consumo ou perda de água durante o processo de hidratação e cura (KISKU *et al.*, 2017).

Dessa forma, a variação volumétrica pode levar à susceptibilidade de fissuração da matriz cimentícia devido ao acúmulo de tensões internas. Com esse entendimento, é possível analisar essa propriedade também como um parâmetro de durabilidade. Isso porque o surgimento e propagação de qualquer abertura na microestrutura pode

facilitar a entrada de agentes deletérios e desencadear processos de deterioração na estrutura de concreto.

Os principais tipos de retração são: química, autógena, plástica, por secagem, térmica, e por carbonatação. Nos próximos tópicos são detalhados os dois tipos de retração adotados no estudo experimental desta dissertação, buscando entender como a incorporação do agregado reciclado pode afetar essa propriedade.

### 3.2.6.1 *Retração Autógena*

A retração autógena pode ser considerada um tipo específico de retração química. Entende-se retração química como aquela relacionada com a redução do volume de concreto em virtude da formação dos produtos de hidratação. Isso ocorre porque os produtos formados possuem um volume menor do que os materiais que lhe originaram.

Especificamente sobre a retração autógena, Neville (2016) pontua que esse fenômeno é consequência da autodessecação que o concreto sofre. Esse tipo de retração ocorre quando há uma diminuição da água livre nos poros do material cimentício. Para Pedro *et al.* (2017), a retração autógena pode ser entendida como a redução do volume aparente (*bulk volume*), em virtude do aumento da tensão capilar.

Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016) investigaram a retração autógena, onde o corpo de prova foi isolado do ambiente por meio de uma película, de forma a impedir a perda de água para o ambiente. As amostras com agregado reciclado apresentaram menor retração autógena que a amostra de referência. Pedro *et al.* (2017) e He *et al.* (2020) também investigaram a retração autógena e resultados similares foram obtidos.

Para Mao *et al.* (2021), a adição do agregado reciclado leva a uma redução da retração autógena. Eles verificaram que o tamanho das partículas, o grau de saturação antes da realização da mistura e a origem do agregado têm grande influência nessa propriedade.

### 3.2.6.2 Retração por secagem

Diferente do que acontece na retração autógena e química, a retração por secagem está associada com a perda de água para o ambiente durante a cura. Como os agregados reciclados apresentam uma maior porosidade e absorção de água, sua presença no concreto afeta significativamente essa propriedade. Brito *et al.* (2016) concluíram que o concreto com substituição de agregado graúdo pelo agregado reciclado levou ao aumento da retração por secagem.

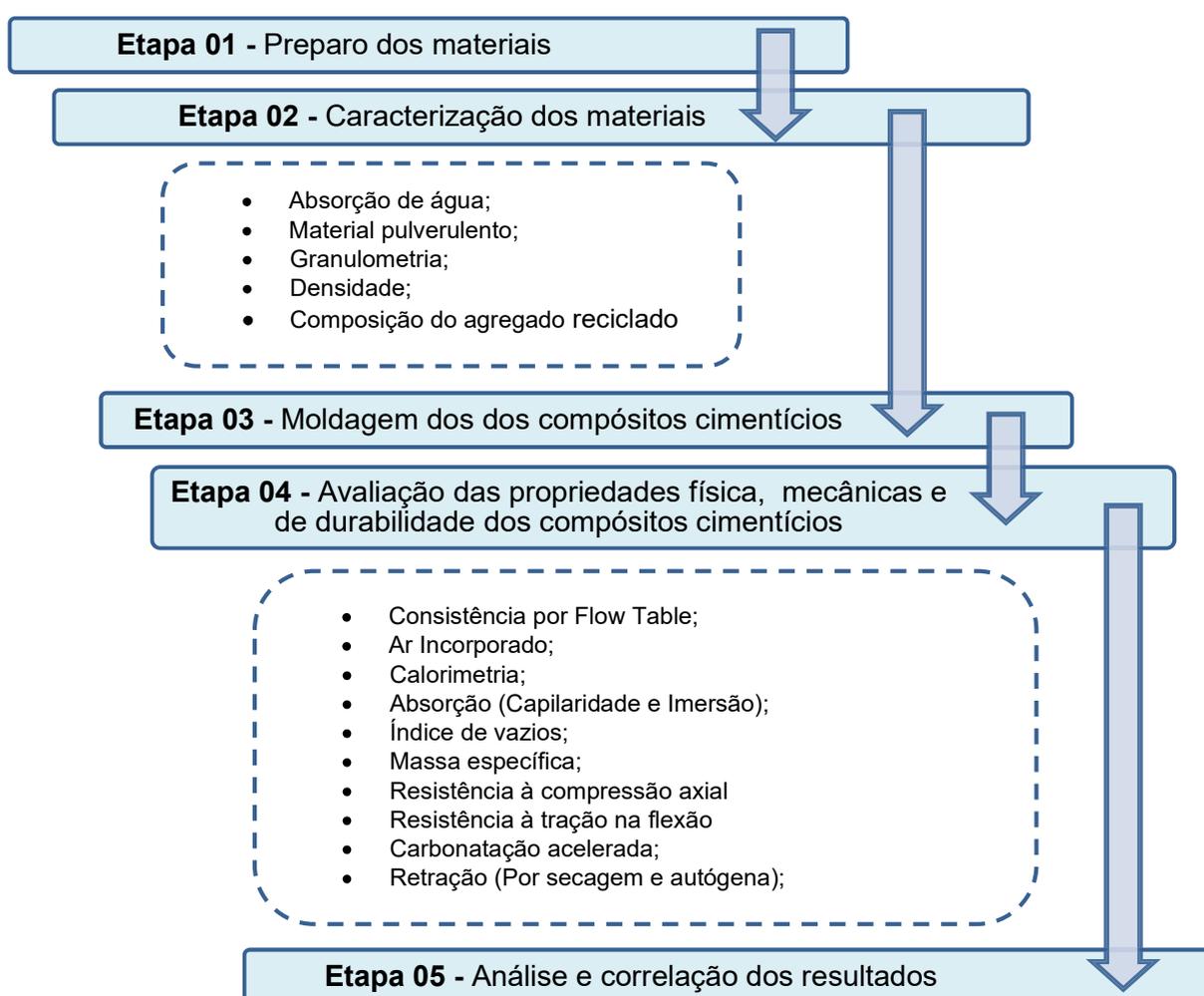
Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Bravo *et al.* (2018) e He *et al.* (2020), também verificaram que a presença do agregado reciclado, promoveu um aumento na retração por secagem. Os pesquisadores associaram esse aumento na retração ao incremento de água de mistura, uma vez que o agregado reciclado é mais absorvente. O que se observa é que quanto maior o teor de substituição realizado, e quanto maior for a quantidade de água na mistura, maior será a retração por secagem.

Em seus estudos, Brito *et al.* (2016) avaliaram a retração em amostras com quantidade de água adicional ou aditivos superplastificantes para garantir a trabalhabilidade do concreto. Percebeu-se que a retração do concreto que foi produzido com agregado reciclado e não houve o aumento de água, teve retração menor que a amostra referência. Entretanto, as amostras que houve a correção da quantidade de água na mistura apresentaram maior retração. Para Medjigbodo *et al.* (2018), isso indica que os agregados reciclados têm potencial se serem utilizados como agentes promotores de cura interna, uma vez que a água absorvida durante a mistura é liberada durante a cura, reduzindo os efeitos da retração. Esse fato também foi apontado por Pickel *et al.* (2017) e Hawary e Sulily (2020).

## 4 METODOLOGIA

Esse capítulo se dedica a apresentar os materiais e métodos que foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa. O programa experimental foi dividido em cinco etapas: (i) preparação dos materiais, (ii) caracterização dos materiais, (iii) moldagem dos compósitos cimentícios, (iv) realização dos ensaios de caracterização física, mecânica e de durabilidade e (v) análise e correlação dos resultados obtidos. O fluxograma do programa experimental proposto é apresentado na Figura 6 abaixo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica (DEMC/UFMG).

**Figura 6:** Fluxograma de atividades.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.1 Materiais

Os materiais que foram utilizados nesse trabalho são: cimento Portland, agregado miúdo natural, agregado miúdo reciclado, aditivo superplastificante e água potável.

### 4.1.1 Cimento Portland

Foram utilizados dois tipos de aglomerantes, sendo o cimento Portland de Alto forno resistente a sulfatos (CP III-32-RS) e o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). A escolha de se utilizar dois tipos de cimento se baseou nas características distintas desses aglomerantes, sobretudo pela presença (ou não) de material cimentício suplementar (no caso, escória de alto forno). Enquanto o CP III-32-RS apresenta uma pega mais lenta e uma maior influência do tempo no ganho de resistência, o CPV-ARI apresenta uma pega acelerada e um elevado ganho de resistência inicial. Além disso, devido a diferença em suas composições, espera-se que os aglomerantes apresentem diferentes comportamentos no que tange a retração. A caracterização destes materiais foram fornecida pelo fabricante e se encontra na Tabela 4.

**Tabela 4:** Caracterização dos cimentos utilizados.

Cimento	Propriedade	Norma	Valor
CP III - 32 RS	Massa Específica	NBR 16605	2,95 g/cm <sup>3</sup>
	Área Específica (Blaine)	NBR 16372	3.503 cm <sup>2</sup> /g
	Início de pega	NBR 16607	221 min
	Fim de pega	NBR 16607	262 min
	Resistencia a compressão – 7 dias	NBR 7215	20,8 MPa
	Resistencia a compressão – 28 dias	NBR 7215	36,5 MPa
CP V-ARI	Massa Específica	NBR 16605	2,97 g/cm <sup>3</sup>
	Área Específica (Blaine)	NBR 16372	4.888 cm <sup>2</sup> /g
	Início de pega	NBR 16607	143 min
	Fim de pega	NBR 16607	179 min
	Resistencia a compressão – 7 dias	NBR 7215	41,2 MPa
	Resistencia a compressão – 28 dias	NBR 7215	Não aplicável

Fonte: Adaptado pelo autor.

#### 4.1.2 Agregados miúdos

Nesse trabalho utilizou-se dois tipos de agregado miúdo, o agregado natural e o reciclado. De acordo com a definição da NBR 7211 (ABNT, 2009), é considerado agregado miúdo todo aquele cujos grãos são inferiores a 4,75 mm e superiores a 75  $\mu$ m.

Como agregado miúdo natural, optou-se por areia quartzosa comercial, do tipo lavada com granulometria fina.

Já a areia reciclada, foi fornecida pela Superintendência de Limpeza Urbana (SLU). O agregado reciclado foi produzido na usina de reciclagem, localizada na BR-040, km 531 - Jardim Filadélfia em Belo Horizonte (MG). Não houve qualquer separação dos materiais para a produção do agregado reciclado, sendo este oriundo da moagem materiais cimentícios e tijolos cerâmicos. Assim, se acordo com NBR 15116 (ABNT, 2021), ele foi classificado como agregado reciclado misto (ARM).

O início da produção do agregado reciclado se inicia na portaria da usina de reciclagem da SLU. Na chegada do material, é realizado uma inspeção visual de forma a identificar se há, ou não, a presença de material contaminantes. Esses contaminantes podem ser barras de aço, gesso, papel, madeira, amianto, solo, entre outros, que inviabilizam o processamento do resíduo de construção e demolição. Nessa vistoria é verificado de forma visual e superficial se há mais de 10% (em volume) de material contaminante na matéria-prima, sendo esse percentual de tolerância praticada atualmente.

O material aprovado, intitulado material bruto (Figura 7), é despejado no pátio, e aberto com auxílio de uma pá carregadeira. Nesse momento é realizado uma segunda inspeção, também visual, de forma a evitar que seja aceito material com contaminantes escondidos. Uma vez aprovado nessa inspeção secundária, dá-se início ao processamento do resíduo. Ressalta-se que, caso constate que o material apresenta quantidade de contaminantes superior à permitida, o material é novamente

reunido e devolvido para o responsável de origem, sendo impedido de descarregar o material na usina de reciclagem.

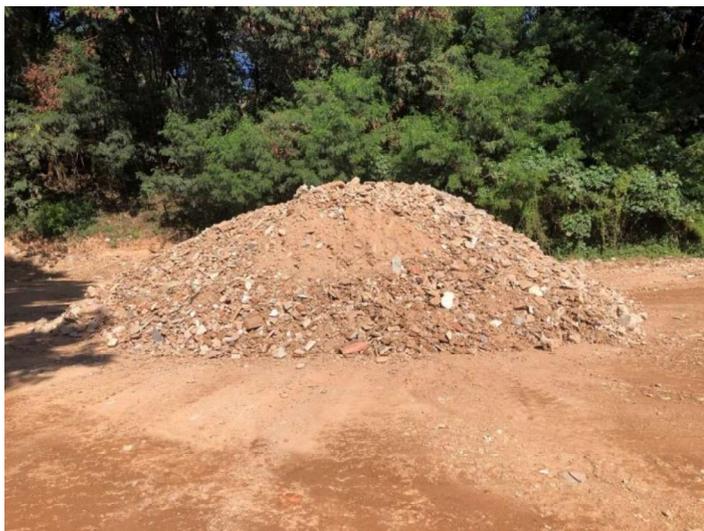
**Figura 7:** Monte de material bruto, anterior ao processamento.



Fonte: Acervo do autor.

A primeira etapa do processamento consiste na remoção dos materiais contaminantes. Essa etapa é feita de forma manual pelos trabalhadores da usina com auxílio de carrinho de mão e pás. Após a remoção dos contaminantes, o agora intitulado material triado (Figura 8) é encaminhado para as peneiras e britadores. O material que foi classificado como contaminantes é encaminhado, posteriormente, para o aterro sanitário de Macaúbas, em Sabará (região metropolitana de Belo Horizonte, MG).

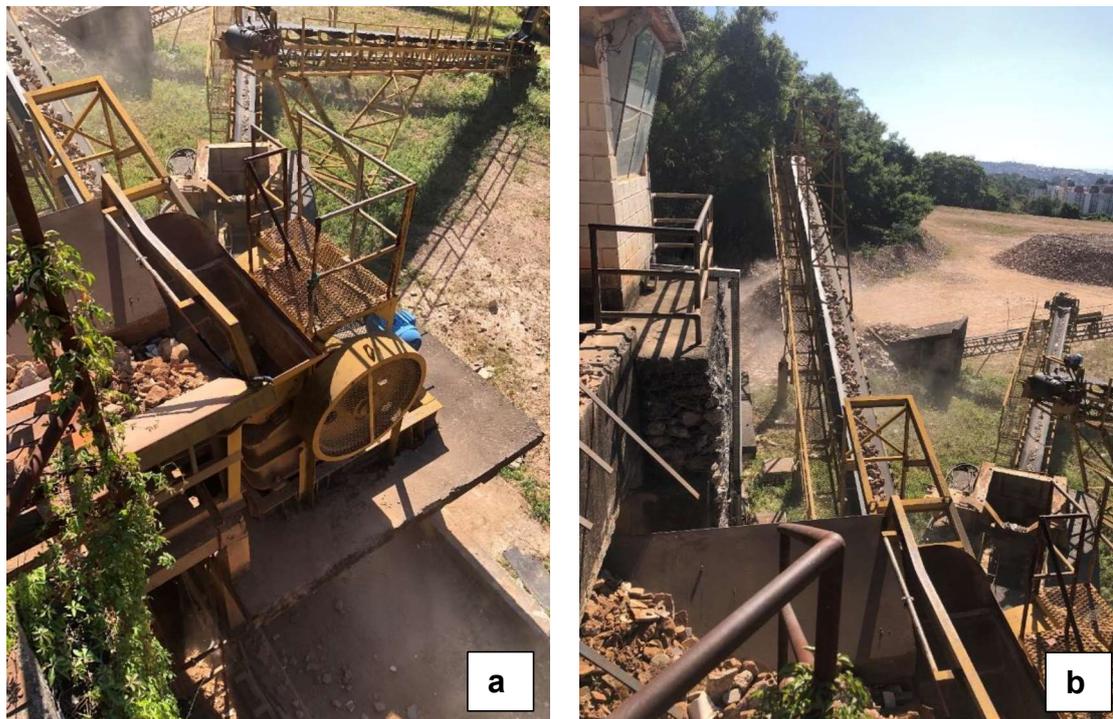
**Figura 8:** Material triado, preparado para início da diminuição de granulometria.



Fonte: Acervo do autor.

O material triado é despejado em uma grelha metálica, com abertura de malha de 2x2 polegadas (Figura 9-a). O material passante dessa grelha, denominado bica corrida, é separado através de correia transporta para o seu respectivo monte. Já o material retido é triturado por um britador primário, do tipo mandíbula. Após triturado, esse material, intitulado rachão, é levado por correias transportadoras até a calha vibratória (Figura 9-b).

**Figura 9:** a) Britador primário. b) Correia transportadora levando a granulometria intitulada rachão.



Fonte: Acervo do autor.

A calha vibratória transporta parte do rachão até outra correia transportadora que leva o material para o deck das peneiras (Figura 10). O material que é despejado nas peneiras é separado nas granulometrias de brita 0, brita 1 e areia. O material que não é classificado em nenhuma dessas granulometrias é levado para o britador secundário, do tipo cone, onde é novamente moído.

Da saída do britador secundário, o material volta novamente para a correia transportadora que leva para o deck das peneiras e é novamente peneirado. Esse ciclo se repete até que todo o agregado reciclado esteja classificado em alguma dessas granulometrias. Atualmente a usina tem capacidade de produção de 200 m<sup>3</sup> por dia de agregado reciclado em boas condições climáticas e de material.

**Figura 10:** Deck das peneiras e peneirador.



Fonte: Acervo do autor.

Para a caracterização dos agregados (convencionais e reciclados) foram realizados os ensaios descritos na Tabela 5.

**Tabela 5:** Caracterização dos agregados natural e reciclado.

<b>Propriedade</b>	<b>Norma</b>
Absorção de água	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Material pulverulento	NBR 16973 (ABNT, 2021)
Granulometria	NBR 17054 (ABNT, 2022)
Densidade na condição seca	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Densidade na condição saturada	NBR 16916 (ABNT, 2021)
Composição do agregado reciclado	NBR 15116 (ABNT, 2021)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para determinar a composição dos agregados reciclados, quanto aos tipos de grãos, uma amostra com 1kg de material foi lavada de forma a remover todas as impurezas e material pulverulento contido. Após o término da lavagem, o material foi levado para estufa, onde permaneceu a temperatura de  $105 \pm 5$  °C até se atingir a constância de massa. Em seguida, quando já resfriado, o material foi separado com auxílio das

peneiras. O material utilizado no ensaio foi aquele passante da peneira de malha de 4,80mm e retido na peneira com malha de 2,40mm.

**Figura 11:** a) Amostra utilizada para classificação dos agregados reciclados. b) Quadrante selecionado para realização da contagem dos grãos. c) Agregados classificados como grupo 1 (grãos com mais de 50% do seu volume por pasta/argamassa de cimento endurecida). d) Agregados classificados como grupo 2 (grãos com mais de 50% do seu volume por rochas). e) Agregados classificados como grupo 3 (grãos com mais de 50% do seu volume por cerâmica vermelha).





Fonte: Acervo do autor.

Depois da separação dos grãos, a amostra preparada foi espalhada em uma folha de papel A4 e separada em quadrantes, conforme ilustrado na Figura 11. Os materiais contidos nos quadrantes foram contabilizados e classificados entre os 4 grupos previstos na NBR 15166 (ABNT, 2021). Foram contados 390 grãos, número superior ao mínimo exigido por norma (que são de 300 grãos).

#### 4.1.3 Aditivo superplastificante

Buscando reduzir a quantidade de água na mistura, optou-se por fazer uso de um aditivo superplastificante. O aditivo empregado foi o PowerFlow 4000 MC, um aditivo do tipo redutor de água, à base de policarboxilato, de cor marrom, disponibilizado pela

empresa MC Bauchemie. Tendo em base os trabalhos de Brito *et al.* (2016) e Tam *et al.* (2018), além da recomendação do fabricante, adotou-se o teor de 1% em relação a massa de cimento anidro.

#### 4.1.4 Água

Para produção das argamassas utilizou-se água de torneira, potável, fornecida pela rede pública da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA).

### 4.2 Preparo dos materiais

Antes de realizar a caracterização dos agregados miúdos e posterior moldagem dos corpos de prova, foi necessário realizar o peneiramento do agregado reciclado, com peneira de malha 4,75 mm. Isso se deve ao fato de que o material cedido pela SLU estava disposto no pátio da usina de reciclagem, podendo apresentar possíveis contaminantes e/ou partículas com dimensões superiores às permitidas para esse tipo de agregado.

Findado esse procedimento, tanto o agregado reciclado quanto o natural foram dispostos em bandejas metálicas e levedados à estufa para a secagem à temperatura de  $105 \pm 5$  °C. O material ficou até que se atingisse a constância de massa.

### 4.3 Moldagem dos compósitos cimentícios

Os compósitos cimentícios (também denominadas argamassas neste trabalho) foram produzidos com ligante hidráulico (CP III-32-RS e CPV-ARI), agregado miúdo (convencional e reciclado), água e aditivo superplastificante. Foram adotados os teores de 0% (referência), 20% e 40% de substituição (em volume) do agregado natural pelo reciclado.

O traço adotado para produção das argamassas foi de 1:2 (cimento:areia) em massa (ou 1:2,8 em volume, aproximadamente). A opção por esse traço foi embasada nos seguintes fatores: primeiramente, desejou-se maximizar a quantidade de cimento em

relação aos agregados para análise da cura interna nas reações cimentícias. Em segundo, adotou-se o mesmo traço utilizado por Almeida (2018), que pesquisou a retração autógena e cura interna de compósitos cimentícios com escória de alto forno. Por último, constatou-se em ensaios preliminares que para manter a relação a/c igual a 0,42, com utilização de 1% de aditivo superplastificante e alcançando um espalhamento de  $200 \pm 10$ mm, era necessário reduzir a quantidade de agregado. O fator a/c = 0,42, foi sugerido por Aitcin (2016), como sendo o limite teórico para ser observar o efeito crítico da retração autógena. Dado a perda de consistência por causa da incorporação do agregado reciclado, relatada na literatura técnica, optou-se pela utilização de água adicional para corrigir a consistência da argamassa, por esse motivo não foi realizado a pré-molhagem dos agregados. Dessa forma ensaios preliminares foram realizados para determinar a quantidade de água a ser adicionada para alcançar o espalhamento previsto, sem alterar a quantidade de superplastificante e mantendo a consistência plástica da argamassa.

Ao todo foram produzidos 10 tipos de argamassas. Para nomenclatura dos diferentes traços, adotou-se o seguinte critério: o primeiro caractere define qual tipo de cimento foi utilizado para produção da amostra (III para CP III 32-RS e V para CP V-ARI). O segundo grupo de caractere refere-se ao teor de agregado reciclado adotado, sendo que, para os casos com 0%, fez-se uso da letra "R" (amostra de referência). Já o terceiro e último grupo, representou a relação água/cimento adotada. Para a relação a/c = 0,42 empregou-se o número "1", enquanto para o fator a/c corrigido (a/c adicional), em função do ensaio de flow table, adotou-se o número "2". Na Tabela 6 está descrito as quantidades de materiais e a proporção da mistura para a produção de 1 m<sup>3</sup> de argamassa.

As argamassas foram produzidas com auxílio de uma argamassadeira mecânica. O procedimento foi adaptado dos trabalhos de Pedro *et al.* (2016) e Bravo *et al.* (2017), com uma ligeira variação do tempo de mistura final entre as amostras produzidas com CP V-ARI e CP III-32-RS.

**Tabela 6:** Quantidade de material (em massa) necessária para produção de 1 m<sup>3</sup> de argamassa.

Amostra	Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Areia natural (kg/m <sup>3</sup> )	Areia reciclada (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	Fator a/c	Correção do a/c	Fator a/c efetivo
III-R-1	578,91	1157,83	0	5,79	243,14	0,42	0,00	0,383
III-20-1	578,91	926,26	203,8	5,79	243,14	0,42	0,00	0,355
III-40-1	578,91	694,69	407,59	5,79	243,14	0,42	0,00	0,328
III-20-2	572,29	915,66	201,46	5,72	251,81	0,42	0,02	0,375
III-40-2	569,03	682,83	400,64	5,69	256,06	0,42	0,03	0,358
V-R-1	579,68	1159,36	0	5,80	243,46	0,42	0,00	0,383
V-20-1	579,68	927,48	204,07	5,80	243,46	0,42	0,00	0,355
V-40-1	579,68	695,61	408,13	5,80	243,46	0,42	0,00	0,328
V-20-2	573,03	916,86	201,73	5,73	252,14	0,42	0,02	0,375
V-40-2	569,77	683,72	401,16	5,70	256,40	0,42	0,03	0,358

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para argamassas produzidas com cimento Portland CPV-ARI o processo adotado foi: todo agregado miúdo, natural e reciclado, quando houver, foi disposto na cuba da argamassadeira, juntamente com 2/3 da água de amassamento. Nesse momento a argamassadeira foi ligada em velocidade lenta por 120 s, para promover a absorção da água pelos agregados e homogeneizar os materiais. Após esse tempo, a argamassadeira foi desligada e nos próximos 30 s foram acrescentados o cimento e o restante da água misturada com o aditivo. Em seguida, a argamassadeira foi ligada novamente, ainda em velocidade lenta, por mais 90 s. Finalizado esse tempo, foi removido com auxílio de uma espátula o material aderido as paredes da cuba e a argamassadeira era ligada na velocidade rápida por mais 180 s, dando fim ao processo de mistura.

Para as argamassas com cimento Portland CP III, foi adotado procedimento análogo, alterando apenas o tempo final, na velocidade rápida. Ao invés dos 180 s, foi adotado um tempo de mistura de 480 s, dada a necessidade de uma maior agitação para garantir a mesma trabalhabilidade na argamassa.

Foram produzidos corpos de prova das seguintes dimensões:

- Cilíndrico, Ø 5x10 cm (corpos de prova para os ensaios de carbonatação, absorção de água por capilaridade, absorção da água por imersão e índice de vazios)
- Prismático, 4x4x16 cm (corpo de prova para os ensaios de flexão 3 pontos e resistência à compressão)
- Prismático, 2,5x2,5x30 cm (corpo de prova para os ensaios de retração por secagem e retração autógena)

As moldagens das amostras foram baseadas nas recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019), com algumas variações no procedimento de adensamento. Os corpos de prova cilíndricos foram adensados com soquete, em 3 camadas, sendo compactados com 10 golpes por camadas. Após a compactação de cada camada, os corpos de prova eram levados a mesa vibratória onde eram vibrados por 15 s.

Os corpos de prova prismáticos também foram adensados com soquete, porém em apenas duas camadas, sendo que em cada camada foram empregados 15 golpes. Após a primeira camada os corpos de prova também foram levados a mesa vibratória onde eram vibrados por 20 s. Logo após a segunda camada era preenchida e então os corpos de prova vibrados por mais 25 s. Optou-se por essa metodologia para garantir que todos os corpos de prova fossem compactados com o mesmo número de golpes e adensados a mesma quantidade de tempo na mesa vibratória.

Concluída a moldagem, as amostras foram cobertas com um plástico filme para evitar a perda de água para o ambiente nas primeiras 24 h. Após esse período, o plástico filme foi retirado, e as amostras desformadas foram levadas para a cura ambiente.

Foi adotado com procedimento de cura ao ar livre, nas condições de laboratório. Durante o período de cura das amostras, foram observados os valores da temperatura e umidade relativa do ar, com auxílio de um termo-higrômetro digital. Durante esse período a temperatura ficou no intervalo de  $25,7 \pm 4^\circ\text{C}$  e umidade relativa do ar em  $60 \pm 20\%$ .

#### **4.4 Ensaaios de caracterização do estado fresco**

Após o preparo das argamassas, iniciou-se a etapa de caracterização de suas propriedades. As primeiras propriedades a serem avaliadas foram do estado fresco.

##### *4.4.1 Flow Table*

Para avaliação da consistência e trabalhabilidade da argamassa, realizou o ensaio de *Flow Table*, regulamentado pela NBR 13276 (ABNT, 2016). Esse ensaio consiste em preencher um molde metálico, em formato de tronco, com argamassa em 3 camadas de igual espessura. As camadas são compactadas com auxílio de um soquete, sendo que cada camada compactada com um determinado número de golpes.

A camada da base foi compactada com 15 golpes, a camada intermediária com 10 golpes e a camada superior com 5 golpes. Após a compactação, realizou o arrasamento e a remoção do molde. Nos próximos 30s, aplicou-se 30 golpes em ritmo constante (Figura 12).

**Figura 12:** Ensaio de *flow table* para determinação da consistência.



Fonte: Acervo do autor

Por último fez-se a leitura do diâmetro de espalhamento em três pontos distintos e calculou-se a média aritmética, sendo essa a medida correspondente a consistência da argamassa.

#### 4.4.2 Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporada das argamassas no estado fresco foi determinado com base nas recomendações da NBR 13278 (ABNT, 2018), usando o equipamento visualizado na Figura 13.

**Figura 13:** Equipamento utilizado para determinação do teor de ar incorporado.



Fonte: Acervo do autor.

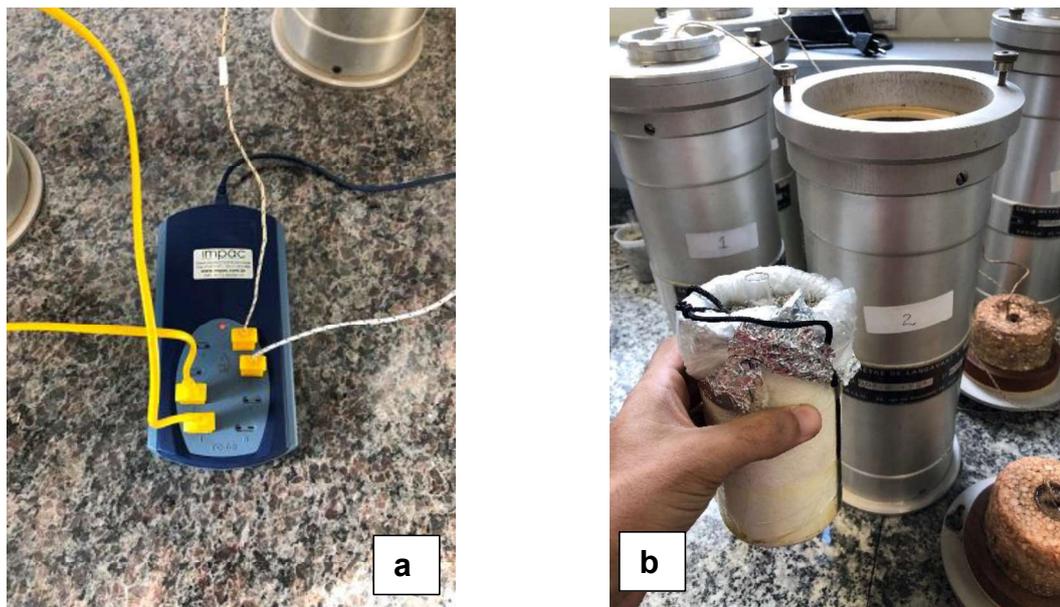
Após a produção das argamassas, o interior do equipamento foi preenchimento, em 3 camadas, sendo cada camada compactada com 20 golpes. O molde foi depositado no interior do equipamento, e posteriormente o recipiente foi fechado. Em uma das extremidades, foi injetada água de forma a retirar todo ar presente no interior. Considerou que todo ar foi removido, quando na válvula oposto começou a jorrar água, indicando que todo o recipiente havia sido preenchido. Logo após, com auxílio de uma bomba, injetou-se ar no interior do recipiente. Com auxílio de um manômetro, acoplado no recipiente, fez-se a leitura da quantidade de ar incorporado.

#### *4.4.3 Calor de hidratação*

Para determinar o calor de hidratação, realizou o ensaio com as garrafas de Langavant, conforme prescrito pela NBR 12006 (ABNT, 2020). Após produzidas, as argamassas foram vertidas em um copo de poliestireno, envolto em papel alumínio, que serviu como molde. Centralizado na amostra foi inserido um tubo de ensaio, com dimensões aproximadas de 13x100mm. Os corpos de prova foram pesados de forma a possibilitar a normatização a variação da temperatura pela massa.

A parte superior foi vedada com uma tampa, também de poliestireno, com um furo no centro por onde acessava o interior do tubo de ensaio. O tubo de ensaio foi preenchido com óleo mineral, aproximadamente 2 cm de altura, de forma a cobrir a ponta do termopar. Com auxílio de cordas, fixadas no molde, as amostras foram inseridas dentro das garrafas de Langavant (Figura 14-b). Após o fechamento da garrafa, iniciou-se o ensaio, sendo a temperatura registrada pelas próximas 72 h. Durante esse período utilizou-se o equipamento USB TC-08 (Figura 14-a) da marca Pico Technology, conectado com os termopares e a um computador para realizar as leituras. Com auxílio do software PicoLog, as leituras eram registradas e armazenadas a cada 1 s.

**Figura 14:** a) Equipamento utilizado para registrar as temperaturas. b) Garrafa de Langavant juntamente com molde lacrado.



Fonte: Acervo do autor.

Além das amostras com argamassa, também foram realizadas leituras de uma amostra de material inerte, um corpo de prova preenchido apenas com areia e água, conforme sugerido pela C175 (ASTM, 2016). O ganho de temperatura durante a hidratação foi calculado pela diferença de temperatura do corpo de prova de argamassa e o inerte.

#### 4.5 Ensaio de caracterização do estado endurecido

Relativo ao estado endurecido, os ensaios foram divididos em três grupos, os de caracterização física, mecânica e os de durabilidade. A Tabela 7 apresenta de forma resumida os ensaios que serão realizados, as idades e a quantidade de corpos de prova por idade.

**Tabela 7:** Resumo dos ensaios do estado endurecido.

<b>Tipo de Caracterização</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>	<b>Idade (dias)</b>	<b>Qte. CP</b>
Física	Absorção por capilaridade	NBR 9779 (ABNT, 2020)	28 e 91	60
Física	Absorção por imersão	NBR 9778 (ABNT, 2019)	28 e 91	
Física	Índice de vazios	NBR 9778 (ABNT, 2019)	28 e 91	60
Física	Massas específicas	NBR 9778 (ABNT, 2019)	28 e 91	
Mecânica	Resistência à tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2019)	7, 28 e 91	90
Mecânica	Resistência à compressão	NBR 16738 (ABNT, 2019)	7, 28 e 91	
Durabilidade	Profundidade de carbonatação	ISO 1920-12 (ASTM, 2015)	28, 56 e 91	30
Durabilidade	Retração por secagem	NBR 15261 (ABNT, 2018)	Até 120	30
Durabilidade	Retração autógena	NBR 15261 (ABNT, 2018)	Até 120	30

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ensaios foram realizados em triplicata para cada traço e idade, com exceção do ensaio de profundidade de carbonatação que foi realizado em duplicata.

##### 4.5.1 Absorção por capilaridade

Para a realização do ensaio de absorção por capilaridade, os corpos de prova foram retirados do local em que se encontravam curando e levados para a estufa. A temperatura da estufa foi ajustada para  $65 \pm 5$  °C, onde os CP's permaneceram até atingirem constância de massa.

Após removidos da estufa, ao atingirem a temperatura ambiente, os corpos de prova foram pesados e iniciou-se o ensaio. As amostras foram colocadas em um recipiente metálico, ficando afastados do fundo por uma grelha. Nesse momento, o recipiente foi preenchido com água até que se atingisse uma altura  $5 \pm 1$  mm. Após isso, as massas foram medidas com auxílio de uma balança digital, com precisão de 0,01 g, após 3, 6, 24, 48 e 72 h em que se encontravam em contato com a água.

**Figura 15:** Ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Acervo do autor.

Findado o prazo de 72 h, os corpos de prova foram rompidos através de compressão diametral, sendo anotado a altura de ascensão da água e o diâmetro das amostras. Utilizando a equação prevista na NBR 9779 (ABNT, 2020), a absorção por capilaridade foi calculada pela expressão:

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad \text{Eq.3}$$

Onde,

$C$  é a absorção de água por capilaridade, em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ,

$M_{\text{sat}}$  é a massa saturada do corpo de prova que permaneceu em contato com a água durante um período especificado, em g,

$M_s$  é a massa do corpo de prova seco, em g,

$S$  é a área da seção transversal, expressa em  $\text{cm}^2$ .

#### *4.5.2 Absorção por imersão*

Para a realização do ensaio de absorção por imersão, os corpos de prova foram retirados do local em que se encontravam curando e levados para a estufa. A temperatura da estufa foi ajustada para  $65 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , onde os CP's permaneceram até atingirem constância de massa, sendo registrado sua massa seca.

Após removidos da estufa, ao atingirem a temperatura ambiente, os corpos de prova foram pesados e iniciou-se o ensaio. As amostras foram colocadas em um recipiente metálico, que foi completado com água, de forma que os CP's ficassem submersos. Essa condição foi mantida por um prazo de 72 h. Após esse período, com auxílio de um ebulidor elétrico (Figura 16-a), a temperatura da água foi elevada até que se iniciasse à fervura. Ao atingir esse ponto, o ebulidor era desligado momentaneamente e então era novamente ligado, de forma a evitar a evaporação d'água durante a realização do ensaio. Esse procedimento foi realizado durante 5 horas. Após esse período, o ebulidor foi removido e as amostras resfriaram a temperatura ambiente.

**Figura 16:** a) Recipiente metálico onde os corpos de prova ficam submersos. b) Balança hidrostática utilizada medir a massa imersa do corpo de prova.



Fonte: Acervo do autor.

Quando os corpos de prova se encontravam em temperatura ambiente, o excesso de água foi removido com um pano úmido e então foram pesados. Foi utilizada uma balança digital, hidrostática, com precisão de 0,01g (Figura 16-b). Para calcular a absorção por imersão foi utilizado a equação prevista na NBR 9778 (ABNT, 2019), transcrita abaixo:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad \text{Eq.5}$$

Onde,

A é a absorção por imersão, em %,

$m_{sat}$  é a massa saturada do corpo de prova que permaneceu submerso em água, que foi seca com auxílio de um pano úmido, em g,

$m_s$  é a massa do corpo de prova após a secagem na estufa, em g.

#### 4.5.3 Índice de vazios e massas específicas

Para determinar o índice de vazios e a massa específica seca, massa específica saturada e massa específica real, das amostras, foram utilizadas as equações previstas na NBR 9778 (ABNT, 2019). Todo o procedimento utilizado para o cálculo dessas propriedades foi descrito no item 4.5.2.

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad \text{Eq.6}$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Eq.7}$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad \text{Eq.8}$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad \text{Eq.9}$$

Onde,

$I_v$  é o índice de vazios, em %,

$\rho_s$  é a massa específica seca,

$\rho_{sat}$  é a massa específica saturada,

$\rho_r$  é a massa específica real,

$m_s$  é a massa do corpo de prova após a secagem na estufa, em g,

$m_{sat}$  é a massa do corpo de prova saturado após a fervura, em g,

$m_i$  é a massa do corpo de prova saturado e imerso, em g,

#### 4.5.4 Resistência à tração na flexão

Para determinar a resistência a tração dos corpos de prova, realizou-se o ensaio de flexão três pontos (Figura 17). As amostras foram ensaiadas com idades de 7, 28 e 91 dias. Antes da realização do ensaio, as dimensões das amostras foram medidas com auxílio de um paquímetro.

**Figura 17:** Ensaio de flexão 3 pontos.



Fonte: Acervo do autor.

Utilizou-se uma prensa servo eletrônica, da Shimadzu, modelo Autograf AGS-X. Seguindo as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005), adotou com velocidade de carregamento 0,45 MPa/s. Para cálculo da resistência a tração na flexão utilizou a equação abaixo, prevista na NBR 13279 (ANBT, 2005).

$$f_{ct,t} = \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad \text{Eq.10}$$

Onde,

$F_{ct,t}$  é a resistência à tração na flexão, em MPa,

$F$  é a força na ruptura, em N,

$l$  é a distância entre apoios, em mm,

$b$  é a largura do corpo de prova, em mm,

$d$  é a altura do corpo de prova, em mm.

#### 4.5.5 Resistência à compressão

Finalizado o ensaio de flexão, aproveitou as exterminadas dos corpos de prova para realizar o ensaio de compressão (Figura 18). O ensaio foi realizado na mesma prensa que se fez o ensaio de flexão e com a mesma taxa de carregamento.

**Figura 18:** Ensaio de compressão.



Fonte: Acervo do autor.

Esse ensaio também foi realizado nas idades de 7, 28 e 91 dias. Para o cálculo da resistência a compressão, utilizou a equação na NBR 16738 (ANBT, 2019), transcrita abaixo.

$$f_c = \frac{F}{A} \quad \text{Eq.11}$$

Onde,

$f_c$  é a resistência a compressão, em MPa,

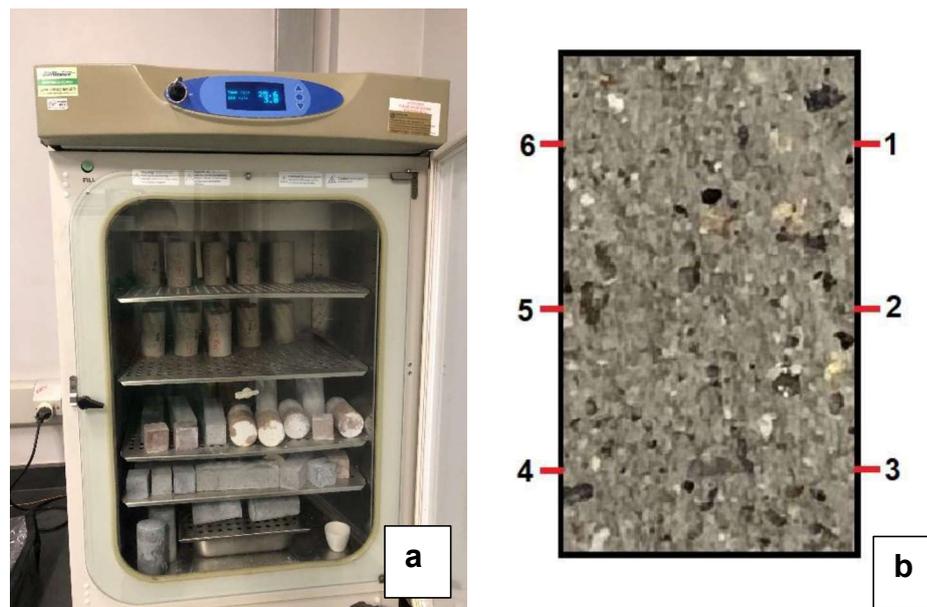
$F$  é a força de ruptura do corpo de prova, em N,

A é a área de contato com a prensa, em mm<sup>2</sup>,

#### 4.5.6 Profundidade de carbonatação

O ensaio de carbonatação acelerada foi realizado em uma câmara da marca Thermo Fisher Scientific, modelo RCO3000T-5-VBC, seguindo as orientações da ISO 1920 (ISO, 2015). Uma vez que os corpos de prova já se encontravam curando em condições ambientes do laboratório, assim que atingiram a idade de 28 dias, foram inseridos na câmara de carbonatação acelerada. O ensaio foi realizado para as idades 28, 56 e 91 dias de condicionamento em atmosfera carbonatada, com concentração de CO<sub>2</sub> de  $3 \pm 0,5$  %, temperatura de  $25 \pm 2$  °C e umidade relativa de  $55 \pm 5$  %.

**Figura 19:** a) Câmara de carbonatação. b) Esquema leitura.



Fonte: Acervo do autor.

Após atingirem a idade do ensaio, os corpos de prova foram retirados da câmara de carbonatação e rompidos diametralmente com auxílio de uma prensa manual. Nas faces rompidas, aspergiu-se solução de fenolftaleína, 1g/100ml. As amostras tratadas foram fotografadas e, com auxílio do software ImageJ, foram medidas as profundidades carbonatadas. Foram realizadas 6 leituras em cada face, sendo essas perpendiculares a maior direção do corpo de prova, conforme Figura 19-b.

O coeficiente de carbonatação acelerada ( $K_a$ ) foi determinado a partir da metodologia proposta por Ribeiro *et al.* (2021). O valor de  $K_a$  é obtido através da regressão linear (plotado em gráfico de profundidade de carbonatação vs. tempo), sendo representado pelo coeficiente angular da reta. Esse parâmetro é medido em  $\text{mm/semana}^{0,5}$ . A classificação da resistência à carbonatação do compósito cimentício a partir dos valores de  $K_a$  são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Classificação da resistência à carbonatação para concretos em ambientes urbanos.

Faixas de Resistência à carbonatação do concreto	Valores de $K_a$ para ambientes urbanos (em $\text{mm/sem}^{0,5}$ )
Excepcional	< 2,55
Muito alta	2,55 – 2,75
Alta	2,75 – 3,10
Moderada	3,10 – 3,75
Baixa	3,75 – 5,00
Muito baixa	5,00 – 7,00
Insignificante	> 7,00

Fonte: Adaptado de Ribeiro *et al.* (2021).

#### 4.5.7 Retração por secagem

Para realização do ensaio de retração por secagem, os corpos de prova foram pesados e em seguida levados para o anteparo onde o ensaio foi realizado (Figura 20). Inicialmente o extensômetro era zerado tomando como referência uma barra de aço INOX padrão, conforme prescrito pela NBR 15261 (ABNT, 2018). Em seguida era medido o comprimento dos corpos de prova em relação a barra de referência. O valor da retração foi cálculo pela seguinte equação:

$$\Delta L = \frac{L_i - L_o}{C_e} \times 10^6 \quad \text{Eq.12}$$

$$C_e = L_o - 2 \times L_p \quad \text{Eq.13}$$

Onde,

$\Delta L$  é retração,  $\mu\text{m}/\text{m}$ ,

$L_i$  é a medida no dia "i" lida no extensômetro, em mm,

$L_o$  é a medida inicial lida no extensômetro, em mm,

$C_e$  é o comprimento efetivo, em m,

$L_p$  é o comprimento do pino de retração, em mm,

**Figura 20:** Ensaio de retração por secagem.



Fonte: Acervo do autor.

A barra utilizada nessa trabalhado possuía comprimento de 295mm e os pinos de retração possuíam comprimento de 26mm cada. Os corpos de prova foram mantidos em ambiente de laboratório (conforme descrito no item 4.5), sendo as leituras realizadas diariamente nos quatro primeiros dias. Após esse período, a leitura foram

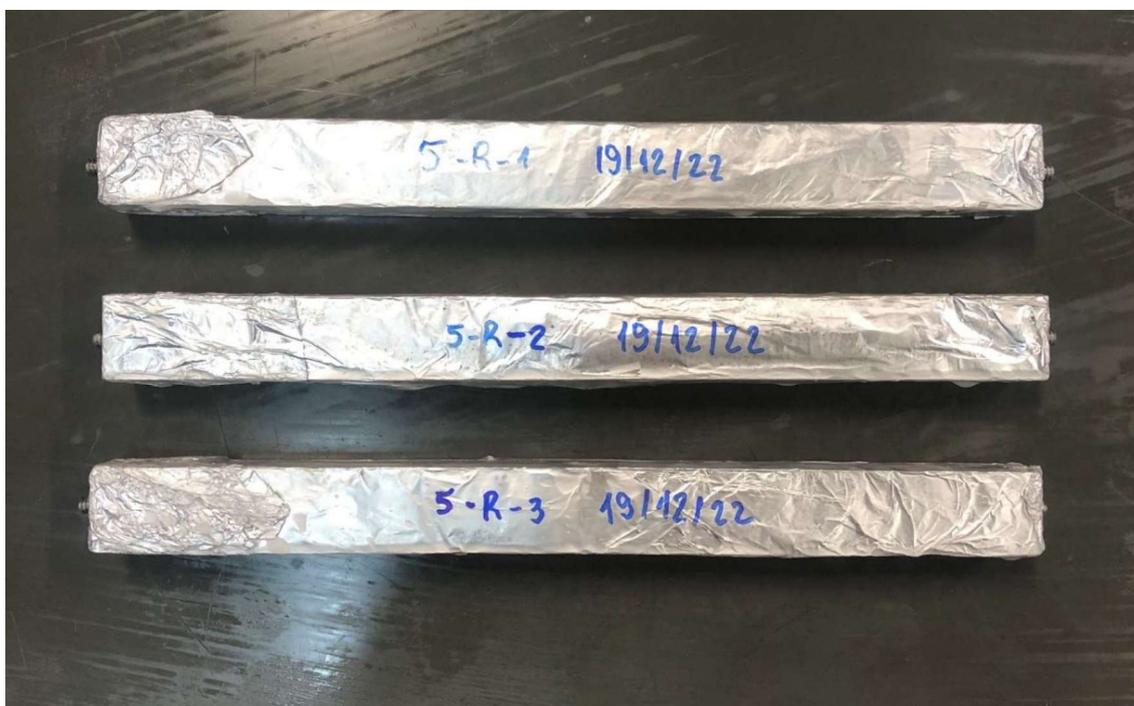
realizadas nas idades de 7, 9, 11 e 14 dias. Depois desse momento as leituras foram realizadas semanalmente até que os corpos de prova atingissem a idade de 120 dias.

#### 4.5.8 Retração autógena

O ensaio de retração autógena foi realizado da mesma maneira que a retração por secagem, sendo a única diferença no preparo do corpo de prova. Para se medir a retração autógena é necessário minimizar a perda de água da amostra para o ambiente. Com isso, busca-se garantir que toda variação volumétrica do compósito cimentício seja decorrente do consumo de água pelas reações de hidratação.

Dessa forma, assim que os corpos de prova foram desformados após 24 h, eles foram revestidos com três camadas de papel alumínio e, em seguida, mergulhados em parafina derretida, de forma a impermeabilizá-los. Esse procedimento foi adaptado dos trabalhos de Neto *et al.* (2008)<sup>1</sup>

**Figura 21:** Corpos de prova do ensaio de retração autógena.



Fonte: Acervo do autor.

<sup>1</sup> O doutorando Thiago Alex Hemkemeier realizou adaptações em seus estudos da metodologia proposta por Neto *et al.* (2008), sendo que a que apresentou melhor capacidade de isolar os corpos de prova do ambiente a utilização de uma tripla película de papel alumínio envolto em parafina.

As amostras foram mantidas em ambiente de laboratório. Assim como na retração por secagem, os corpos de prova foram previamente pesados a fim de verificar a sua perda de massa ao longo do tempo. O cálculo da retração se deu pelas mesmas Equações 12 e 13 utilizadas para análise da retração por secagem. As medidas foram realizadas diariamente nos quatro primeiros dias. Após esse período, a leitura foram realizadas nas idades de 7, 9, 11 e 14 dias. Depois desse momento as leituras foram realizadas semanalmente até que os corpos de prova atingissem a idade de 120 dias.

#### **4.6 Análise e correlação dos resultados**

Os resultados foram apresentados a partir da média aritmética e desvio padrão entre os valores obtidos. Também foram realizados tratamentos estatísticos por meio de ANOVA (análise de variância) e Teste Tukey (par a par), considerando nível de significância de 5%.

Com isso, buscou-se relacionar os resultados obtidos com as propriedades dos materiais utilizados. Além disso, os resultados das amostras com agregado reciclado foram comparados com os de referência, além de valores encontrados literatura. Assim, avaliou-se a efetividade dos diferentes teores de agregados reciclados na cura interna de compósitos cimentícios com diferentes tipos de cimento.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo se dedica a apresentar os resultados obtidos para os agregados utilizados, bem como as argamassas, tanto no estado fresco, quando no endurecido. Os resultados individuais de cada ensaio, assim como a média, desvio padrão e coeficiente de variação podem ser vistos no Apêndice B.

### 5.1 Análise dos agregados convencionais e reciclados

A seguir, são apresentados os resultados de absorção de água, teor de material pulverulento, granulometria, densidade e composição dos agregados.

#### 5.1.1 Absorção de água

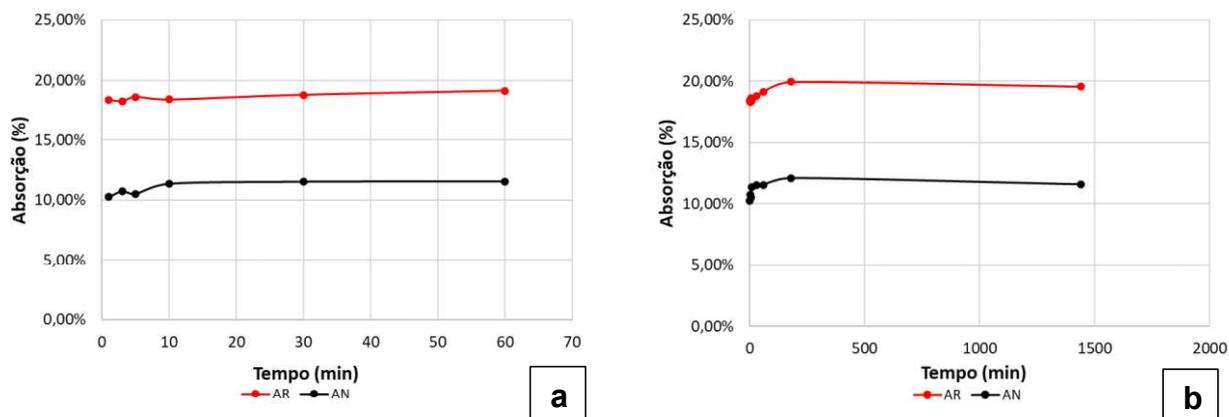
O resultado do ensaio de absorção de água, tanto da areia comum quanto da areia reciclada, segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021) são apresentados na Tabela 9. Também foi realizado o ensaio de absorção conforme NBR 16917 (ABNT, 2021), utilizando apenas a fração passante na peneira nº 8 e retida na peneira nº 10. Os resultados do ensaio são apresentados na Figura 22.

**Tabela 9:** Absorção de água dos agregados miúdos.

<b>Amostra</b>	<b>Absorção de água (%)</b>
Agregado natural	1,84 ± 0,06
Agregado reciclado	9,99 ± 0,08

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 22:** Evolução da absorção de água, por imersão, dos agregados miúdos. a) minutos iniciais. b) durante todo o ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se tanto pela Tabela 9 quanto pela Figura 22 que os agregados reciclados apresentam uma maior absorção de água que os agregados naturais. Para a absorção segundo a NBR 16917 (ABNT, 2021), essa diferença é superior a 5 vezes. Observa-se também que essa absorção acontece quase que instantaneamente, se mantendo praticamente constante durante todo o ensaio. Para agregados reciclados misto, a NBR 15116 (ABNT, 2021) estabelece que a absorção deve ser inferior a 12%, dessa forma o material atende os requisitos normativos.

Os resultados encontrados estão dentro dos intervalos estabelecidos nas revisões bibliográficas de Nedeljković *et al.* (2016) e Kirthika *et al.* (2020), onde a absorção dos agregados reciclados miúdos variaram entre 4% e 14%.

### 5.1.2 Material pulverulento

O resultado do ensaio de material pulverulento, tanto da areia comum quanto da areia reciclada são apresentados na Tabela 10.

**Tabela 10:** Material pulverulento dos agregados miúdos.

Amostra	Material pulverulento (%)
Agregado natural	4,49 ± 0,16
Agregado reciclado	13,29 ± 0,29

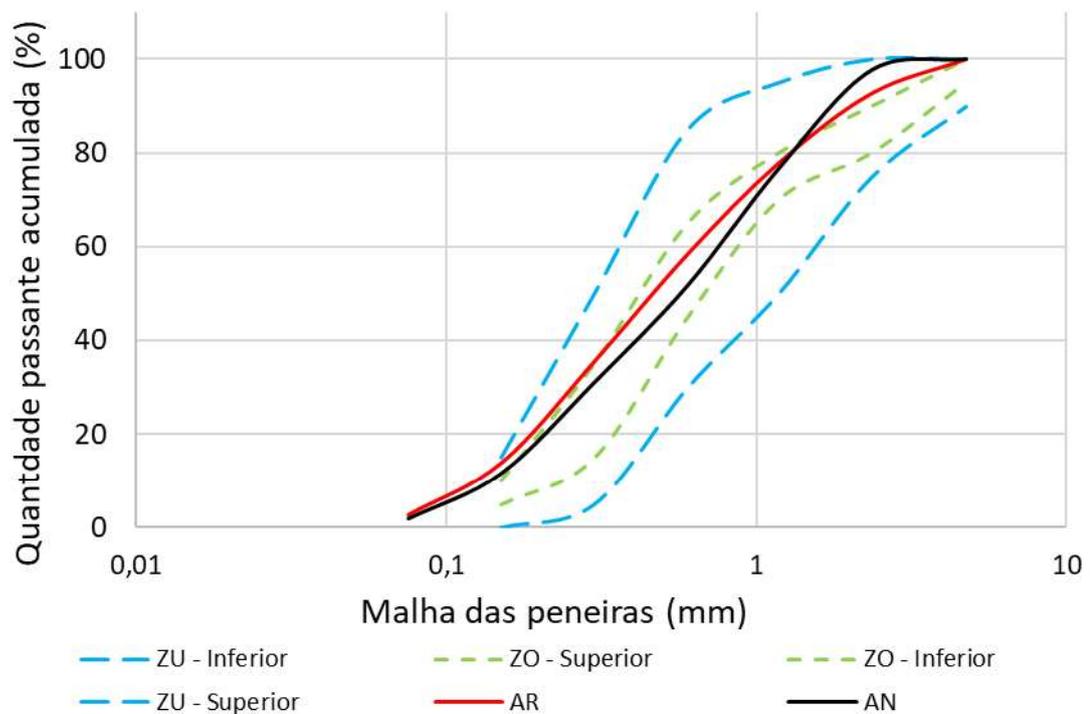
Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que os agregados reciclados apresentam uma a maior concentração de material pulverulento, sendo esse aumento aproximadamente de 3 vezes. Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2022) o teor aceitável de material pulverulento, para concretos submetidos a desgaste superficial é de 3%. Dessa forma, nenhum dos agregados utilizados nesse trabalho atendem aos critérios normativos. Cabe ressaltar que Kirthika *et al.* (2020), observaram em seu trabalho teores de material pulverulento entre 7,6% e 18,3% para os agregados reciclado, portanto, o material utilizado encontra-se dentro dos teores relatos na literatura.

### 5.1.3 Granulometria

Os resultados da distribuição granulométrica, tanto da areia comum quanto da areia reciclada, são apresentados na Figura 23. Também estão indicadas as zonas utilizável e ótima definidas pelas NBR 17054 (ABNT, 2022).

**Figura 23:** Curva granulométrica dos agregados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Relativo à curva granulométrica dos agregados, ambos se encontram dentro da zona de utilização, sendo que em grande parte da distribuição granulométrica estando dentro da zona ótima. As curvas dos agregados reciclados e naturais estão paralelas e muito próximas, mostrando similaridade entre os materiais. Há uma pequena diferença na distribuição dos grãos de maior diâmetro, relativo as peneiras nº 8 e 14 (abertura de malha de 1,20mm e 2,40mm, respectivamente).

#### 5.1.4 Densidade na condição seca e saturada

O resultado das densidades, tanto na condição seca quanto saturada, para areia comum e reciclada, segundo a NBR 16916 (ABNT, 2021) são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11:** Densidade na condição seca e na condição de superfície saturada seca dos agregados miúdos.

Amostra	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{sss}$ (g/cm <sup>3</sup> )
Agregado natural	2,08 ± 0,02	2,12 ± 0,02
Agregado reciclado	1,83 ± 0,01	2,02 ± 0,02

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que os agregados reciclados apresentam menor densidade que os agregados naturais. Para densidade na condição seca, o agregado reciclado apresenta densidade aproximadamente 12% menor que o agregado natural, já para condição de superfície saturada seca essa diferença é de 5%.

Para Shi *et al.* (2016) e Tam *et al.* (2018), os principais motivos da diferença de densidade entre os agregados naturais e reciclados é a presença da argamassa aderida aos grãos do agregado e diversidade de materiais que podem constituir o agregado reciclado.

### 5.1.5 Composição do agregado reciclado

A composição do agregado reciclado, segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021) é apresentada na Tabela 12. Já na Figura 24, ilustra o aspecto do agregado reciclado após lavado, durante da realização da contagem dos grãos.

**Tabela 12:** Distribuição do tipo de grão do agregado reciclado.

Grupo	Grãos contados	Distribuição (%)
G1: Fragmentos de pastas de cimento	196	50,26
G2: Fragmentos de rocha	105	26,92
G3: Fragmentos de cerâmica vermelha	88	25,56
G4: Fragmento de materiais indesejados	1	0,26

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 24:** Amostra do agregado reciclado lavado.



Fonte: Acervo do autor.

O agregado reciclado utilizado no trabalho consiste majoritariamente de restos de argamassas e pasta de cimento. O restante do material é dividido quase que igualmente entre rochas e cerâmicas vermelhas. Observa-se também que a catação

realizada pela SLU surgiu efeito, uma vez que dentre de todas os grãos analisados, apenas 1 de grão de materiais indesejados foi encontrado. De acordo com NBR 15116 (ABNT, 2021), para utilização do agregado reciclado em produtos e compósitos cimentícios é necessário que G4 seja inferior a 1%, dessa forma, o agregado utilizado nesse trabalho atende a esse critério e estaria apto a ser utilizado para produção de argamassas e concretos.

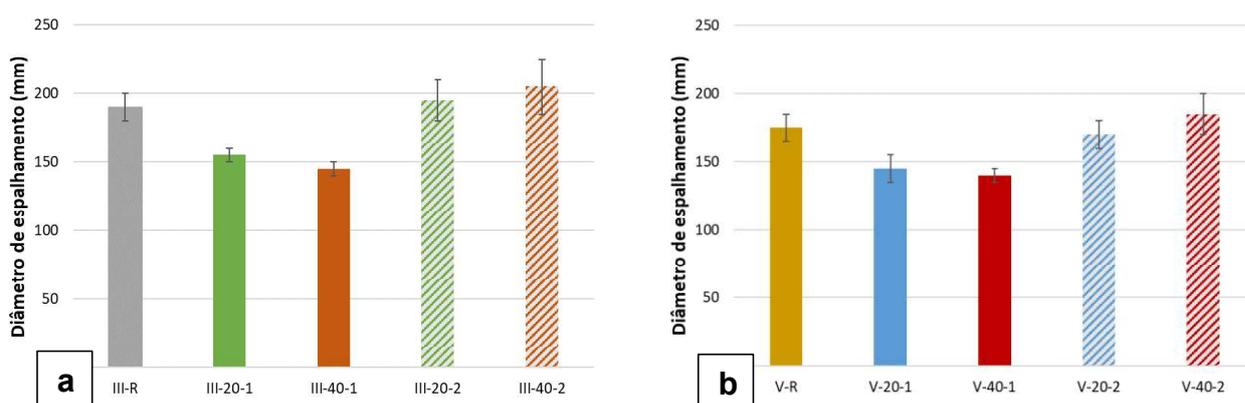
## 5.2 Propriedades no estado fresco dos compósitos cimentícios

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de consistência por *flow table*, teor de ar incorporado, densidade e calor de hidratação.

### 5.2.1 Consistência das argamassas

Os resultados da consistência das argamassas por meio do ensaio de Flow Table estão apresentados na Figura 25.

**Figura 25:** Consistência das argamassas pelo ensaio de Flow Table: a) amostras com CP III-RS; b) amostras com CPV-ARI



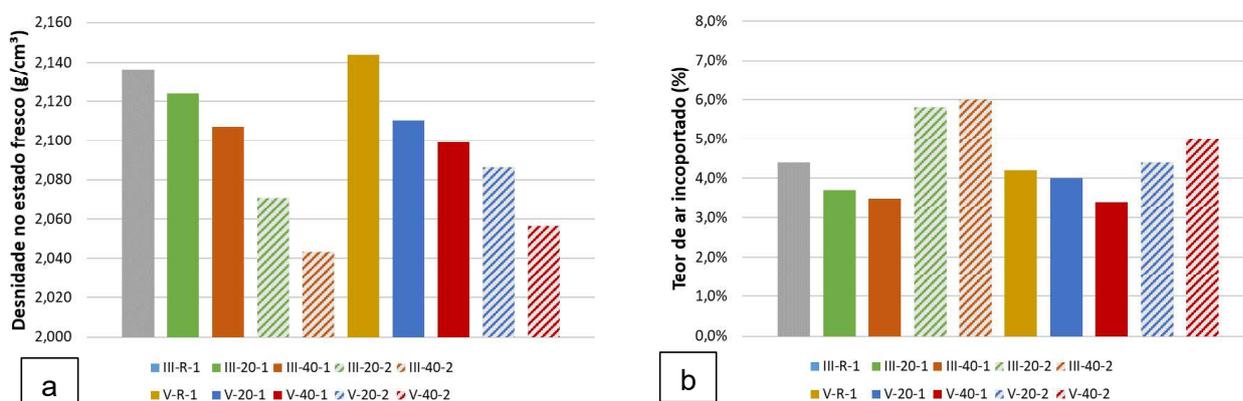
Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi observado que à medida que o teor de agregados reciclados aumentava, diminuía-se os valores da *Flow Table*. Também foi observado que para o cimento com maior finura (CPV-ARI), os valores de abatimento foram ainda mais inferiores.

### 5.2.2 Teor de ar incorporado e densidade no estado fresco

Os resultados dos ensaios de teor de ar incorporado e densidade no estado fresco, para as argamassas produzidas CP III-32-RS e CPV-ARI, com agregados naturais e reciclados, estão apresentados na Figura 26.

**Figura 26:** a) Densidade no estado fresco nas argamassas CPIII-RS e CPV-ARI. b) Teor de ar incorporado nas argamassas CPIII-RS e CPIV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambos os tipos de cimento, a presença do agregado reciclado promoveu uma redução da densidade no estado fresco, sendo essa redução proporcional a quantidade de agregado reciclado utilizado. Essa propriedade também foi afetada pela quantidade de água na mistura. Dessa forma, os traços com menor densidade foram aqueles que continham a maior quantidade de água e agregado reciclado. Essa redução foi de aproximadamente 4,4% quando comparado os traços III-R-1 e III-40-2 e de 4,1% quando comparados V-R-1 com V-40-2.

Cartuxo *et al.* (2015) e Silva *et al.* (2018) mencionam que essa redução da densidade no estado fresco está relacionada com a menor densidade do agregado reciclado, sendo que essa diminuição proporcional a quantidade de agregado reciclado utilizado na mistura.

Já referente ao teor de ar incorporado, ambos os cimentos também apresentaram o mesmo comportamento. Os traços com 20% e 40% de substituição do agregado

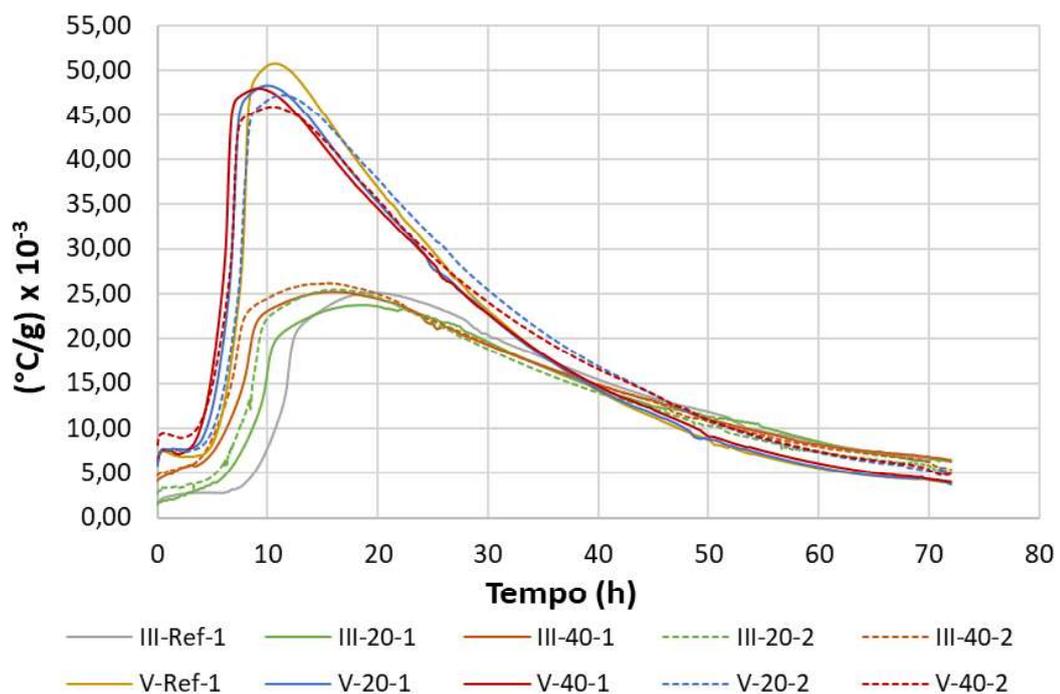
natural pelo reciclado tiveram um menor índice de teor de ar incorporado. Enquanto aqueles que se fez uso da água adicional, apresentaram um aumento da quantidade de ar incorporada na argamassa. Esse aumento foi de aproximadamente 1,6% para CPIII-RS e de 0,8% para CPV-ARI, quando comparados a referência e os traços com 40% de agregado reciclado que fez uso da água adicional.

Kurda *et al.* (2016) e Silva *et al.* (2018) relatam que para pequenas quantidades de agregado não é observado alterações significativas entre as amostras de referência e a com agregado reciclado, no que tange a quantidade de ar incorporado, fato esse também observado nesse trabalho.

### 5.2.3 Calorimetria

Os resultados dos ensaios de calorimetria para as amostras produzidas CP III-32-RS e CPV-ARI, com agregados naturais e reciclados, estão apresentados na Figura 27. A Tabela 13 apresenta a quantidade de calor máxima, normalizada pela massa da amostra, bem como o horário de sua ocorrência.

**Figura 27:** Curva calorimétrica das argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 13:** Quantidade de calor máxima liberada e horário de ocorrência.

<b>Amostra</b>	<b>Tempo (h)</b>	<b>Calorimetria (°C/g) x 10<sup>-3</sup></b>
III-R-1	19:37 ± 0:16	25,144 ± 0,962
III-20-1	18:26 ± 0:13	23,757 ± 0,561
III-40-1	15:52 ± 0:09	25,223 ± 0,911
III-20-2	16:18 ± 0:20	25,485 ± 0,374
III-40-2	15:04 ± 0:45	26,200 ± 1,462
V-R-1	10:40 ± 0:04	50,829 ± 0,605
V-20-1	09:56 ± 0:23	48,371 ± 0,845
V-40-1	09:12 ± 0:27	48,053 ± 1,729
V-20-2	11:18 ± 0:26	47,300 ± 1,636
V-40-2	10:27 ± 0:23	45,974 ± 0,794

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA entre os dois grupos de estudo, verificando-se que há diferença significativa entre a quantidade máxima de calor liberado das amostras e do tempo em que esse pico ocorreu. Na Tabela 14 tem-se o resumo do ANOVA referente quantidade de calor liberado.

**Tabela 14:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a quantidade de calor liberado.

<b>Grupo de verificação</b>	<b>F-crítico</b>	<b>F</b>	<b>Relevância</b>
CPIII	3,4780	1,8162	Não significativo
CPV	3,4780	4,2043	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso das amostras com CPIII-RS, tem-se que F é menor que o F crítico, o que indica que não há diferença significativa entre as amostras avaliadas. Entretanto, já para as amostras com CPV-ARI, observou-se uma diferença significativa em pelo menos duas amostras. Por isso, prosseguiu-se com a realização do teste de Turkey para identificar quais amostras diferem entre si. O resultado desse teste está esquematicamente representado na Tabela 15. Cabe ressaltar que apesar de observado uma diferença estatística entre os dados, todas as curvas apresentaram comportamentos semelhantes.

**Tabela 15:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a variável a quantidade de calor liberado.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
V-20-1		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1			Não se aplica	≡	≡
V-20-2				Não se aplica	≡
V-40-2					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que existe uma diferença significativa apenas entre a amostra de referência (V-R-1) e a amostra V-40-2. Nesse caso, houve uma redução de calor liberado durante a hidratação de aproximadamente 10%. A amostra em questão é a argamassa com CPV-ARI que apresentava maior quantidade de água, podendo essa ser a responsável pela diminuição do calor liberado.

Essa hipótese é reforçada pelo trabalho de Jeong *et al.* (2020), onde se identificaram que a presença do agregado reciclado por si só não influencia na quantidade de calor liberado. Hu *et al.* (2014) e Koenders *et al.* (2014), avaliaram a influência da relação a/c na liberação do calor durante a hidratação. Para esses pesquisadores, uma maior relação a/c promove uma diluição do cimento durante a fase de dissolução e um resfriamento do sistema cimentício, e por isso é observado uma menor quantidade de calor liberado.

Referente ao período em que o pico de liberação de calor aconteceu, a Tabela 16 apresenta o resumo do ANOVA.

**Tabela 16:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado o período em que pico da liberação ocorreu.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPIII	3,4780	44,2937	Significativo
CPV	3,4780	9,2737	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambos os grupos se tem que  $F$  é maior que o  $F$  crítico, o que nos permite afirmar que há uma diferença significativa em ambos os grupos. O resultado do teste de Turkey para as amostras com CIII-RS e CPV-ARI estão nas Tabela 17 e Tabela 18, respectivamente.

**Tabela 17:** Teste Turkey das amostras produzidas com CIII-RS, sendo avaliado a variável hora em que pico da liberação ocorreu.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1	Não se aplica	≡	≠	≠	≠
III-20-1		Não se aplica	≠	≠	≠
III-40-1			Não se aplica	≡	≡
III-20-2				Não se aplica	≡
III-40-2					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 18:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a variável hora em que pico da liberação ocorreu.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1	Não se aplica	≡	≠	≡	≡
V-20-1		Não se aplica	≡	≠	≡
V-40-1			Não se aplica	≠	≠
V-20-2				Não se aplica	≡
V-40-2					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se uma diferença entre a amostra de referência (III-R-1) e as amostras III-40-1, III-20-2 e III-40-2. Também houve distinção entre a amostra III-20-1 e as amostras III-40-1, III-20-2 e III-40-2. A presença do agregado reciclado, especialmente no teor de 40%, trouxe uma antecipação na hidratação das argamassas, evidenciado pela ocorrência do pico de liberação de calor aproximadamente 4h antes que a referência.

Já para as amostras com CPV, identificou-se que as diferenças são entre as amostras: V-R-1 e V-40-1; V20-1 e V-20-2; e ainda entre V-40-1 e V-20-2 e V-40-2. Para o primeiro caso, houve uma antecipação do pico de calor entre as amostras de 88 minutos, sendo que o pico ocorreu primeiro na amostra V-40-1. Já para o segundo caso, a diferença entre o horário do pico foi de 82 minutos, sendo que este ocorreu

primeiro na amostra sem o acréscimo de água (V-20-1). Por último, entre as amostras V-40-1 e V-20-2 houve uma diferença de 126 minutos, enquanto na V-40-1 e V-40-2 de 75 minutos.

De forma geral, a presença do agregado reciclado, não afetou a quantidade de calor liberado, entretanto promoveu uma antecipação do pico de calor. Essa antecipação foi observada nos dois tipos de cimento utilizada, sendo proporcional a quantidade de agregados natural substituída.

A antecipação do pico de calor foi relatada nos trabalhos de Koenders *et al.* (2014), Pepe *et al.* (2014) e Nelfia *et al.* (2016). Esse fato está relacionado com a absorção do agregado reciclado. Por serem mais absorventes, os agregados reciclados diminuem a relação  $a/c_{\text{efetiva}}$ . Outro fato levantado pelos pesquisadores, é que por apresentar uma maior área superficial, esse material também serve como ponto de nucleação, proporcionando a formação dos produtos de hidratação.

Hu *et al.* (2014) diz que a relação  $a/c$  utilizada influencia o horário em que o pico de calor acontece. Isso porque para maiores relações de água/cimento, há uma diminuição no ritmo da hidratação, dada a diluição do cimento. Fato esse também exposto por Koenders *et al.* (2014). Esse fenômeno foi observado apenas para as amostras produzidas com CPV-ARI. Quando comparamos os traços com agregados reciclados sem acréscimo de água e com acréscimo, observa-se que nos últimos a hidratação aconteceu de forma tardia. Ou seja, o excesso de água livre ( $a/c_{\text{efetiva}}$ ) pode levar a um resfriamento do sistema e, conseqüentemente, a um retardo do início do período de aceleração da hidratação, como observado as amostras de referência.

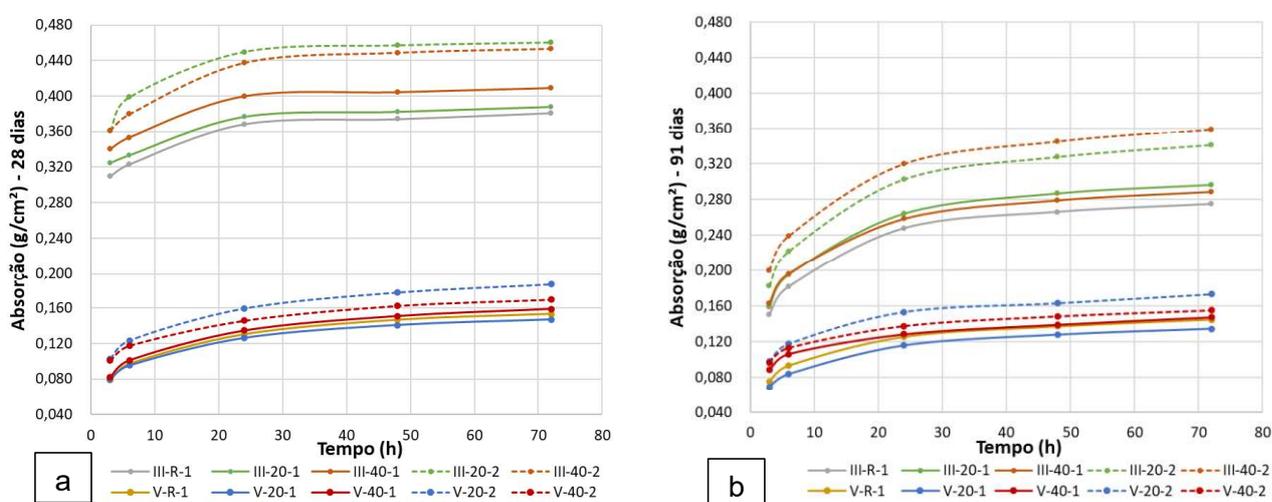
### **5.3 Propriedades físicas dos compósitos cimentícios**

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade e imersão, índice de vazios e massa específica dos compósitos cimentícios estudados.

### 5.3.1 Absorção por capilaridade e imersão

Os resultados dos ensaios de absorção por capilaridade, das argamassas estudadas, segundo a NBR 9779 (ABNT, 2020), para as idades de 28 e 91 dias são apresentados na Figura 28.

**Figura 28:** Absorção por capilaridade das argamassas com CPIII-RS e CPV-ARI: a) aos 28 dias; b) aos 91 dias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambas as argamassas estudadas, observou-se que com o avanço da idade houve uma redução da absorção por capilaridade para todos os traços avaliados. Sendo que os casos das argamassas produzidas com CPV-ARI essa diminuição da absorção por capilaridade devido ao envelhecimento das amostras foi muito menos expressivo que as argamassas produzidas com CPIII-RS. Enquanto para as primeiras amostras essa diminuição variou entre 6,0% e 9,3%, para as amostras com CPIII-RS, essa diminuição ficou entre 26,1% e 41,7%.

Essa diferença de comportamento pode ser explicada pela natureza dos cimentos. Enquanto o CPV-ARI as reações de hidratação acontecerem de forma rápida, as reações do CPIII-RS acontecem de forma lenta, devido à presença da escória. A hidratação tardia da escória, consumiu a água presente no compósito, deixando

espaços vazios dentro da amostra o que levou a uma diminuição da pressão capilar, o que conseqüentemente, promoveu uma diminuição da absorção por capilaridade.

Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA entre os quatro grupos de estudo, verificando-se há diferença significativa entre absorção por capilaridade das amostras. Na Tabela 19 tem-se o resumo do ANOVA. Cabe mencionar que todos os traços apresentaram curvas com comportamento semelhante.

**Tabela 19:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a absorção por capilaridade.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPIII-28d	3,4780	5,2616	Significativo
CPIII-91d	3,4780	37,2448	Significativo
CPV-28d	3,4780	10,5919	Significativo
CPV-91d	3,4780	4,1037	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os grupos de estudo, observou os valores de F superiores ao F-crítico, indicando que para todos os casos há diferença significativa entre as amostras dos grupos de estudo. Em seguida, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se nas Tabela 20 e Tabela 21.

**Tabela 20:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por capilaridade.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≠	≡
III-20-1-28d		Não se aplica	≡	≡	≡
III-40-1-28d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-28d				Não se aplica	≡
III-40-2-28d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-91d			Não se aplica	≠	≠
III-20-2-91d				Não se aplica	≡
III-40-2-91d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 21:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por capilaridade.

<b>Amostra</b>	<b>V-R-1</b>	<b>V-20-1</b>	<b>V-40-1</b>	<b>V-20-2</b>	<b>V-40-2</b>
<b>V-R-1-28d</b>	Não se aplica	≡	≡	≠	≡
<b>V-20-1-28d</b>		Não se aplica	≡	≠	≡
<b>V-40-1-28d</b>			Não se aplica	≠	≡
<b>V-20-2-28d</b>				Não se aplica	≡
<b>V-40-2-28d</b>					Não se aplica
<b>V-R-1-91d</b>	Não se aplica	≡	≡	≡	≡
<b>V-20-1-91d</b>		Não se aplica	≡	≠	≡
<b>V-40-1-91d</b>			Não se aplica	≡	≡
<b>V-20-2-91d</b>				Não se aplica	≡
<b>V-40-2-91d</b>					Não se aplica

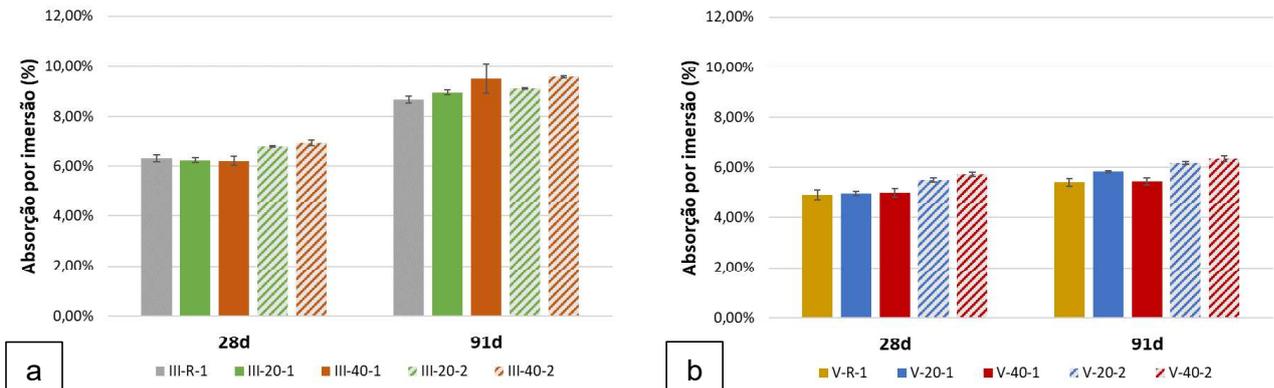
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as amostras com 28 dias, produzidas com CPIII-RS, observou-se uma diferença entre a amostra de referência (III-R-1) e as amostras III-20-2, sendo a amostra com resíduo mais absorvente que a referência. Já para a idade de 91 dias, constatou-se uma diferença entre as amostras III-20-2 e III-40-2 com os traços III-R-1, III-20-1 e III-40-1. Em todos esses casos, as amostras são menos absorventes que os traços III-20-2 e III-40-2, o que indica uma influência da relação a/c na propriedade avaliada dado que não houve diferença entre as amostras apenas com resíduos, sem acréscimo de água, com a referência.

Já para as amostras produzidas com CPV-ARI, o que se observou é que para a idade de 28 dias, houve diferença entre as amostras nas amostras V-20-2 com V-R-1, V-20-1 e V-40-1. De forma similar ao que foi observado para as amostras com CPIII-RS, o acréscimo de água promoveu um aumento da absorção, por capilaridade, das argamassas. Enquanto, para as amostras com 91 dias, essa diferença diminuiu, existindo apenas entre a amostra V-20-1 e V-20-2.

Os resultados dos ensaios de absorção por imersão das argamassas estudadas, segundo a NBR 9778 (ABNT, 2019), para as idades de 28 e 91 dias são apresentados na Figura 29.

**Figura 29:** Resultados do ensaio de absorção de água por imersão aos 28 e 91 dias de idade: a) amostras com CP III-RS; b) amostras com CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA entre os quatro grupos de estudo, verificando-se há diferença significativa entre absorção por imersão das amostras. Na Tabela 22 tem-se o resumo do ANOVA.

**Tabela 22:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CP III-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a absorção por imersão.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CP III-28d	3,4780	15,6247	Significativo
CP III-91d	3,4780	3,9139	Significativo
CPV-28d	3,4780	15,0073	Significativo
CPV-91d	3,4780	26,8848	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os grupos de estudo, observou os valores de F superiores ao F-crítico, indicando que para todos os casos há diferença significativa entre as amostras. Em seguida, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se nas Tabela 23 e Tabela 24.

**Tabela 23:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por imersão.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-28d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-28d			Não se aplica	≠	≠
III-20-2-28d				Não se aplica	≡
III-40-2-28d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≡	≡	≡
III-40-1-91d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-91d				Não se aplica	≡
III-40-2-91d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 24:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado a absorção por imersão.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
V-20-1-28d		Não se aplica	≡	≠	≠
V-40-1-28d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-28d				Não se aplica	≡
V-40-2-28d					Não se aplica
V-R-1-91d	Não se aplica	≠	≡	≠	≠
V-20-1-91d		Não se aplica	≠	≡	≠
V-40-1-91d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-91d				Não se aplica	≡
V-40-2-91d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a idade de 28 dias, as argamassas produzidas com CPIII-RS, apresentaram diferença entre III-20-2 com os traços III-20-1 e III-40-1 e entre a amostra III-40-2 com os traços III-R-1, III-20-1 e III-40-1. Com o envelhecimento da amostra, essas diferenças diminuíram, permanecendo apenas para a referência (III-R-1) e III-40-2. Assim como aconteceu com a absorção por capilaridade, as diferenças foram

observadas nas amostras com acréscimo de água. A presença dessa água adicional promoveu um aumento da absorção por parte das argamassas. Um fato notável é que ao contrário do que aconteceu com o ensaio de absorção por capilaridade, o envelhecimento da amostra levou a um aumento da absorção por imersão. Para a idade de 91 dias, a amostra com 40% de agregado reciclado e acréscimo de água apresentou absorção superior em 10,5%.

Esse aumento da absorção está relacionado com a velocidade de hidratação da escória. Como a hidratação do cimento composto é lenta, parte da água disponível para hidratação é evaporada, o que acaba criando espaços vazios nas amostras, aumentando o índice de vazios, o que por sua vez leva a um aumento da absorção por imersão. Esse efeito não é observado nas amostras CPV-ARI porque a água é rapidamente consumida durante a hidratação do compósito.

Referente às amostras com CPV-ARI, aos 28 dias, observou-se uma diferença entre V-20-2 e V-40-2 com os traços V-R-1, V-20-1 e V-40-1. Dessa forma, assim como aconteceu para as argamassas produzidas com CPIII-RS, as amostras que foram produzidas com acréscimo de água apresentaram diferenças significativas na absorção por imersão, levando a um aumento dessa propriedade. Para as amostras com 91 dias, essa diferença foi entre V-R-1 e V-20-1 e V-20-2 e V-40-2; V-20-1 e V-40-1 e V-40-2 e V-40-1 e V-20-2 e V-40-2. Verifica-se que as amostras que com resíduo apresentaram uma absorção superior a referência, entretanto esse aumento foi inferior ao promovido pelo acréscimo de água. Para o caso de V-R-1 e V-20-1, o traço com resíduo levou a um ganho aproximado de 7,8%, enquanto ao compararmos V-R-1 com V-20-2, esse aumento foi de 14,2%. Já o traço V-40-2 teve um aumento ligeiramente superior, sendo de 17,4%, mostrando que o acréscimo de água e de agregado reciclado aumento ainda mais a absorção da argamassa.

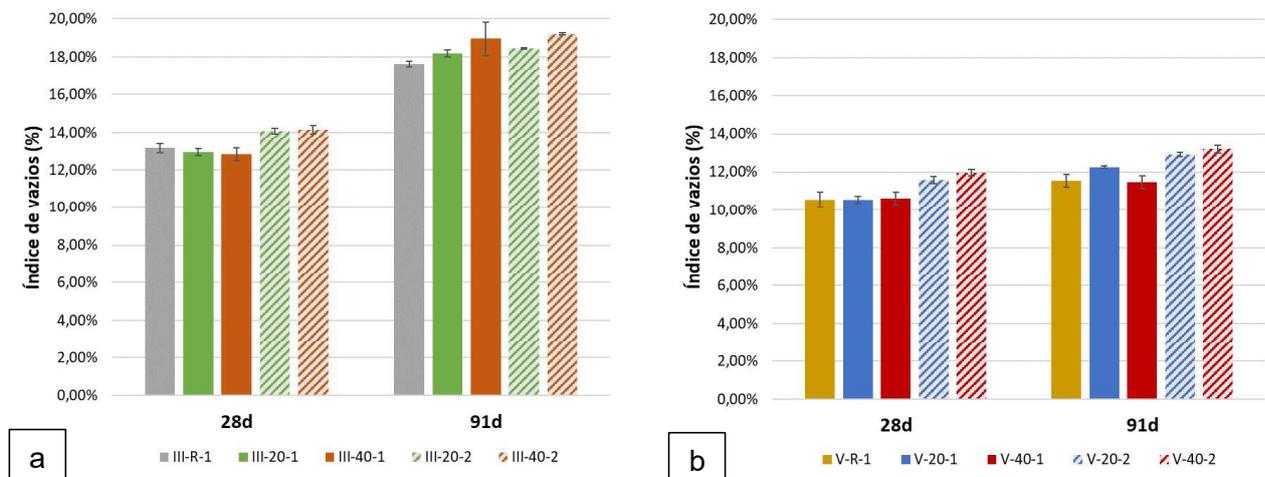
O aumento da absorção era esperado, dado a natureza mais absorvente dos agregados reciclados. Esse fato foi relato por Vieira *et al.* (2016), Bravo *et al.* (2018) e Zhang *et al.* (2019). Para os pesquisadores, o aumento da absorção acontece de forma proporcional ao aumento da quantidade de agregado reciclado na mistura, dada a natureza absorvente desse material. Bravo *et al.* (2018) ainda comenta que o

material de origem do agregado reciclado tem papel importante nessa propriedade. Vieira *et al.* (2016) encontrou aumentos na absorção entre 5% e 31%, ao estudar substituições de 20%, 50% e 100%, do agregado natural pelo reciclado. Pode-se dizer que os resultados encontrados nesse trabalho estão de acordo com outros relatados na literatura técnica.

### 5.3.2 Índice de vazios e massa específica

Os resultados dos ensaios de índice de vazios das argamassas avaliadas, com idades de 28 e 91 dias, com e sem agregado reciclado, estão apresentados na Figura 30. Cabe mencionar que essas propriedades foram medidas de forma indireta, uma vez que foram calculadas através do ensaio de absorção por imersão.

**Figura 30:** Resultados do ensaio de índice de vazios aos 28 e 91 dias de idade: a) amostras com CP III-RS; b) amostras com CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA entre os grupos de estudo, verificando-se há diferença significativa entre o índice de vazios das amostras. Na Tabela 28 tem-se o resumo do ANOVA.

**Tabela 25:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPV-ARI e CPV-ARI, sendo avaliado índice de vazios.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPV-28d	3,4780	15,0894	Significativo
CPV-91d	3,4780	4,7202	Significativo
CPV-28d	3,4780	12,4802	Significativo
CPV-91d	3,4780	21,9937	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os grupos de estudo, observou os valores de F superiores ao F-crítico, indicando que para todos os casos há diferença significativa entre as amostras. Em seguida, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se nas Tabela 26 e Tabela 27.

**Tabela 26:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado índice de vazios.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
III-20-1-28d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-28d			Não se aplica	≠	≠
III-20-2-28d				Não se aplica	≡
III-40-2-28d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≡	≡	≡
III-40-1-91d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-91d				Não se aplica	≡
III-40-2-91d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 27:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 28 e 91 dias, sendo avaliado índice de vazios.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
V-20-1-28d		Não se aplica	≡	≠	≠
V-40-1-28d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-28d				Não se aplica	≡
V-40-2-28d					Não se aplica

<b>V-R-1-91d</b>	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
<b>V-20-1-91d</b>		Não se aplica	≠	≡	≠
<b>V-40-1-91d</b>			Não se aplica	≠	≠
<b>V-20-2-91d</b>				Não se aplica	≡
<b>V-40-2-91d</b>					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a idade de 28 dias, as argamassas produzidas com CPIII-RS, apresentaram diferença entre III-20-2 e III-40-2 com os traços III-R-1, III-20-1 e III-40-1. As diferenças foram observadas apenas nas argamassas que se fez uso do acréscimo de água, sendo os traços com 20% e 40% de agregado reciclado, onde não se fez uso da água adicional, estatisticamente equivalente a referência. Já com 91 dias, a diferença entre as amostras diminuiu, ficando apenas entre a referência (III-R-1) e III-40-2. Para esse último caso, a adição de 40% do agregado reciclado junto com a água, promoveu um aumento no índice de vazios de 8,8%.

De forma semelhante ao que aconteceu com as argamassas produzidas com CPIII-RS, as amostras produzidas com CPV-ARI, aos 28 dias, também apresentaram diferença apenas entre os traços V-20-2 e V-40-2 com os traços V-R-1, V-20-1 e V-40-1. Sendo que os traços com acréscimo de água aqueles que apresentaram o maior índice de vazios. Aos 91 dias, essas diferenças ficaram entre os traços V-R-1 e V-20-2 e V-40-2; V-20-1 e V-40-1 e V-40-2; V-40-1 e V-20-2 e V-40-2. Assim como na idade de 28 dias, as amostras com maior quantidade de água apresentaram maiores índices de vazios. Diferente do observado para os traços com CPIII-RS, não houve muita alteração entre as propriedades medida aos 28 dias e 91 dias. Ao serem comparadas com a referência, os traços V-20-2 e V-40-2 apresentaram aumento de 11,9% e 14,3% no índice de vazios, respectivamente.

De forma geral, as amostras com agregado reciclados, sem acréscimo de água não apresentaram mudanças estatisticamente relevantes no índice de vazios. Entretanto, ao se acrescentar água para que as argamassas atingissem a consistência desejada, viu-se o índice de vazios aumentar para os dois tipos de cimento utilizados.

Os resultados dos ensaios de massa específica das argamassas nas idades de 28 e 91 dias, com e sem agregado reciclado, está apresentado na Tabela 28. Cabe mencionar que essas propriedades foram medidas de forma indireta, uma vez que foram calculadas através do ensaio de absorção por imersão.

**Tabela 28:** Massas específicas para das argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, com idades de 28 e 91 dias.

Amostra	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )		$\rho_{real}$ (g/cm <sup>3</sup> )	
	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias	28 dias	91 dias
III-R-1	2,08 ± 0,01	2,21 ± 0,01	2,39 ± 0,01	2,08 ± 0,01	2,21 ± 0,01	2,39 ± 0,01
III-20-1	2,07 ± 0,01	2,20 ± 0,01	2,38 ± 0,01	2,07 ± 0,01	2,20 ± 0,01	2,38 ± 0,01
III-40-1	2,06 ± 0,01	2,19 ± 0,01	2,36 ± 0,01	2,06 ± 0,01	2,19 ± 0,01	2,36 ± 0,01
III-20-2	2,07 ± 0,02	2,21 ± 0,02	2,41 ± 0,03	2,07 ± 0,02	2,21 ± 0,02	2,41 ± 0,03
III-40-2	2,04 ± 0,01	2,18 ± 0,01	2,38 ± 0,01	2,04 ± 0,01	2,18 ± 0,01	2,38 ± 0,01
V-R-1	2,04 ± 0,02	2,21 ± 0,01	2,47 ± 0,02	2,04 ± 0,02	2,21 ± 0,01	2,47 ± 0,02
V-20-1	2,03 ± 0,01	2,21 ± 0,01	2,48 ± 0,01	2,03 ± 0,01	2,21 ± 0,01	2,48 ± 0,01
V-40-1	2,00 ± 0,03	2,19 ± 0,02	2,46 ± 0,01	2,00 ± 0,03	2,19 ± 0,02	2,46 ± 0,01
V-20-2	2,03 ± 0,01	2,21 ± 0,01	2,49 ± 0,01	2,03 ± 0,01	2,21 ± 0,01	2,49 ± 0,01
V-40-2	2,01 ± 0,01	2,20 ± 0,01	2,48 ± 0,01	2,01 ± 0,01	2,2 ± 0,01	2,48 ± 0,01

Fonte: Elaborado pelo autor.

Referente as densidades das amostras, não houve alterações significativas. De forma geral, os traços com agregado reciclado apresentaram densidade inferior a referência e superiores aqueles cujo foi necessário o acréscimo de água. Observou-se também que com o passar do tempo as amostras apresentaram uma redução na densidade, esse fato aconteceu para todos os traços. Para as amostras de CPIII-RS, o traço com menor densidade (III-40-2) apresentou densidade 1,8% menor que a referência aos 28 dias e de 1,4% aos 91 dias. Já para os traços com CPV-ARI, essa redução foi ligeiramente maior, sendo de 2,5% aos 28 dias e de 2,6% aos 91 dias.

Uma ligeira redução de densidade poderia ser esperada, uma vez que os agregados reciclados apresentaram densidade inferior aos agregados naturais. Esse fato foi pontuado por Silva *et al.* (2016), Tahar *et al.* (2017), Zhang *et al.* (2019) e Thomas *et al.* (2020). Para os dois primeiros trabalhos, onde foram estudadas substituições entre 15% e 25%, também se observou uma variação mínima na densidade, sendo a

densidade das argamassas com agregado com agregado reciclado praticamente igual à da referência.

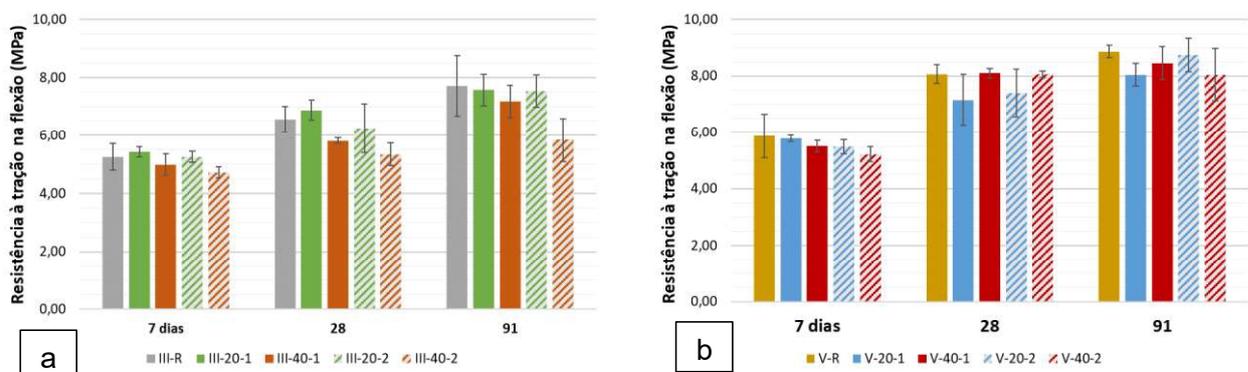
#### 5.4 Resistência mecânica dos compósitos cimentícios

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração e compressão, para as argamassas produzidas CP-III-32-RS e CPV-ARI, tanto com agregados naturais, quanto reciclados.

##### 5.4.1 Resistência à tração

O resultado do ensaio de resistência à tração para as idades de 7, 28 e 91 dias está na Figura 31.

**Figura 31:** Evolução da resistência à tração por flexão das argamassas: a) CP-III-RS; b) CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível verificar que para ambos os tipos de cimento utilizados não houve variações expressivas dentro de uma mesma idade, com exceção do traço III-40-2 com 91 dias. Também é possível identificar uma tendência de aumento da resistência com ao longo do tempo, principalmente para os traços com CP-III-RS.

Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA de duas formas. Primeiramente foi verificado se há diferença estatística entre o mesmo traço em

diferentes idades, de forma a verificar se com o passar do tempo houve variação na resistência. Em seguida, foi realizado a comparativo entre diferentes traços, mas com a mesma idade, de forma a verificar a influência, ou não, da utilização dos agregados e da correção do fator água cimento. Esse procedimento foi realizado tanto para as amostras com CIII-RS, quanto para as com CPV-ARI.

**Tabela 29:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado ganho de resistência com o avanço da idade.

<b>Grupo de verificação</b>	<b>F-crítico</b>	<b>F</b>	<b>Relevância</b>
CIII-Ref	5,1432	5,9790	Significativo
CIII-20-1	5,1432	16,1865	Significativo
CIII-40-1	5,1432	16,5352	Significativo
CIII-20-2	5,1432	7,4420	Significativo
CIII-40-2	5,1432	2,5914	Não significativo
CPV-Ref	5,1432	18,8410	Significativo
CPV-20-1	5,1432	7,8740	Significativo
CPV-40-1	5,1432	38,1168	Significativo
CPV-20-2	5,1432	14,3172	Significativo
CPV-40-2	5,1432	16,9105	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com exceção do traço CIII-40-2, todos os demais apresentaram um valor de F superior ao de F-crítico, indicando que há diferença estatísticas entre as amostras. Para as amostras com relevância significativa foi realizado teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados dos testes encontram-se nas Tabela 30 e Tabela 31.

**Tabela 30:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a diferença de resistência com o passar do tempo.

<b>Amostra</b>	<b>III-7d</b>	<b>III-28d</b>	<b>III-91d</b>
<b>III-R-1-7d</b>	Não se aplica	≡	≠
<b>III-R-1-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>III-R-1-91d</b>			Não se aplica
<b>III-20-1-7d</b>	Não se aplica	≠	≠
<b>III-20-1-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>III-20-1-91d</b>			Não se aplica
<b>III-40-1-7d</b>	Não se aplica	≡	≠
<b>III-40-1-28d</b>		Não se aplica	≠
<b>III-40-1-91d</b>			Não se aplica
<b>III-20-2-7d</b>	Não se aplica	≡	≠
<b>III-20-2-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>III-20-2-91d</b>			Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 31:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a diferença de resistência por idades.

<b>Amostra</b>	<b>V-7d</b>	<b>V-28d</b>	<b>V-91d</b>
<b>V-R-1-7d</b>	Não se aplica	≠	≠
<b>V-R-1-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>V-R-1-91d</b>			Não se aplica
<b>V-20-1-7d</b>	Não se aplica	≠	≡
<b>V-20-1-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>V-20-1-91d</b>			Não se aplica
<b>V-40-1-7d</b>	Não se aplica	≠	≠
<b>V-40-1-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>V-40-1-91d</b>			Não se aplica
<b>V-20-2-7d</b>	Não se aplica	≠	≠
<b>V-20-2-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>V-20-2-91d</b>			Não se aplica
<b>V-40-2-7d</b>	Não se aplica	≠	≠
<b>V-40-2-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>V-40-2-91d</b>			Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso é possível afirmar que houve alteração na resistência com o envelhecimento da amostra. Para as argamassas produzidas com CPIII-RS, verificou-se que há uma tendência de ganho de resistência com o passar do tempo. Já para as amostras produzidas com CPV-ARI, o que vemos é que a partir do 28° dia, essa tendência de aumento é interrompida apresentando um comportamento mais constante. Não se observando mais diferença estatística entre as amostras.

**Tabela 32:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliada diferença na resistência em virtude do traço.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPIII-07d	3,4780	1,7292	Não significativo
CPIII-28d	3,4780	3,0628	Não significativo
CPIII-91d	3,4780	2,2988	Não significativo
CPV-07d	3,4780	0,8562	Não significativo
CPV-28d	3,4780	0,8217	Não significativo
CPV-91d	3,4780	1,1821	Não significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se avaliar os diferentes traços em uma mesma idade, encontrou-se para todos os casos o valor de F foi inferior ao de F-crítico, o que significa que não há diferença estatística significativa entre eles, podendo serem considerados semelhantes. Dessa forma a presença do resíduo, e a correção do fator  $a/c$ , não afetaram a resistência à tração na flexão.

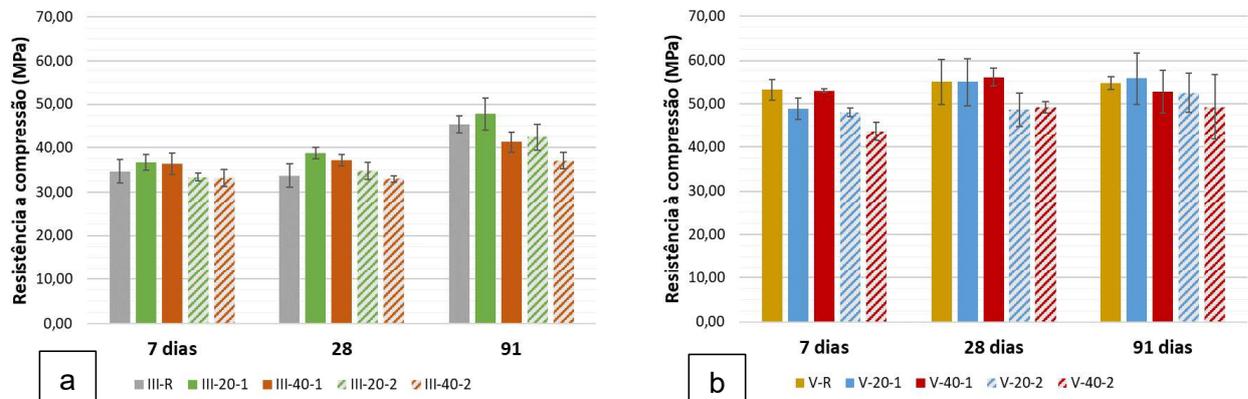
Era esperado que a resistência à tração na flexão fosse inferior a referência. Esse fato já foi relato por diversos pesquisadores, como Pedro *et al.* (2015), Medjigbodo *et al.* (2016) e Vieira *et al.* (2016). Entretanto também há relatos na literatura, onde não foi observada diminuição na resistência à flexão. Como por exemplo, no trabalho Cartuxo *et al.* (2015), Lotfy *et al.* (2015), Tahar *et al.* (2017) e Dang *et al.* (2018). Para esses autores essa equidade na resistência está relacionada com a origem do agregado, associado com um possível efeito pozolânico e a melhor compacidade da argamassa, o que compensaria a menor rigidez dos agregados reciclados. Outra possibilidade para a não observância dessa redução é o efeito da cura interna promovidas pelos agregados reciclados, dados que os corpos de prova foram curados em temperatura

ambiente. Dessa forma, a água absorvida durante o emassamento foi liberada e proporcional uma hidratação mais prolongada.

#### 5.4.2 Resistência à compressão

O resultado do ensaio de resistência à compressão para as idades de 7, 28 e 91 dias está na Figura 32.

**Figura 32:** a) Evolução da resistência à compressão, para argamassas. a) CIII-RS; b) CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível verificar que para ambos os tipos de cimento utilizados, não houve variações muito grandes na resistência à compressão dentro de uma mesma idade. Também é possível identificar uma tendência de aumento da resistência com o passar do tempo, principalmente para os traços com CIII-RS, já para os traços com CPV-ARI, após aos 7 dias a resistência aparenta ser constante.

Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA de duas formas. Primeiramente foi verificado se há diferença estatística entre o mesmo traço em diferentes idades, de forma a verificar se com o passar do tempo houve variação na resistência. Em seguida, foi realizado a comparativo entre diferentes traços, mas com a mesma idade, de forma a verificar a influência, ou não, da utilização dos agregados e da correção do fator água cimento. Esse procedimento foi realizado tanto para as amostras com CIII-RS, quanto para as com CPV-ARI.

**Tabela 33:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado ganho de resistência com o avanço da idade.

<b>Grupo de verificação</b>	<b>F-crítico</b>	<b>F</b>	<b>Relevância</b>
CPIII-Ref	3,6823	38,1129	Significativo
CPIII-20-1	3,6823	29,6812	Significativo
CPIII-40-1	3,6823	7,8647	Significativo
CPIII-20-2	3,6823	25,7428	Significativo
CPIII-40-2	3,6823	10,3614	Significativo
CPV-Ref	3,6823	0,4209	Não significativo
CPV-20-1	3,6823	3,0454	Não significativo
CPV-40-1	3,6823	1,8566	Não significativo
CPV-20-2	3,6823	2,4626	Não significativo
CPV-40-2	3,6823	2,4612	Não significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Identificou-se que todos os traços produzidos com CPIII-RS obtiveram F superior a F-crítico, indicando que há sim diferença significava entre as amostras. Entretanto, o oposto aconteceu com as argamassas confeccionadas com CPV-ARI, onde todos os traços apresentam F inferior ao F-crítico. Dessa forma é possível dizer que para esse tipo de cimento, a passagem do tempo não influenciou na resistência da argamassa. Esse efeito já era esperado, dado que esse tipo de cimento foi concebido para apresentar elevadas resistências nos primeiros dias. Para as amostras com relevância significativa foi realizado teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados dos testes encontram-se na Tabela 34.

**Tabela 34:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a diferença de resistência com o passar do tempo.

Amostra	III-7d	III-28d	III-91d
III-R-1-7d	Não se aplica	≡	≠
III-R-1-28d		Não se aplica	≠
III-R-1-91d			Não se aplica
III-20-1-7d	Não se aplica	≡	≠
III-20-1-28d		Não se aplica	≠
III-20-1-91d			Não se aplica
III-40-1-7d	Não se aplica	≡	≠
III-40-1-28d		Não se aplica	≠
III-40-1-91d			Não se aplica
III-20-2-7d	Não se aplica	≡	≠
III-20-2-28d		Não se aplica	≠
III-20-2-91d			Não se aplica
III-20-2-7d	Não se aplica	≡	≠
III-20-2-28d		Não se aplica	≠
III-20-2-91d			Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou para as amostras avaliadas, não houve diferença na resistência à compressão entre as idades 7 e 28 dias. No entanto, constatou-se que as amostras de 7 e 91 dias e de 28 e 91 dias, diferem-se entre si. Dessa forma é possível afirmar que houve um ganho de resistência com o avanço da idade dos corpos de prova, principalmente entre as idades de 28 e 91 dias.

Diferente do que que ocorreu com as amostras produzidas com o CPV-ARI, as argamassas confeccionadas com CPIII-RS apresentaram ganho de resistência após o 28º dia. Esse ganho de resistência a compressão em idades mais avançadas acontece em virtude da hidratação da escória. A água mantida no sistema pelos agregados é utilizada dando continuidade a hidratação do compósito. A Tabela 35 traz o aumento percentual da resistência à compressão com o envelhecimento das amostras.

**Tabela 35:** Aumento da resistência à compressão das amostras CPIII-RS com o passar do tempo.

Amostra	Aumento da Resistência
CPIII-Ref	34,75%
CPIII-20-1	23,35%
CPIII-40-1	11,15%
CPIII-20-2	22,04%
CPIII-40-2	12,25%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 36 traz os resultados do teste ANOVA, onde foi comparando a existência de diferenças dos resultados a compressão entre os diferentes tipos de traço em uma mesma idade.

**Tabela 36:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliada diferença na resistência em virtude do traço. Valor de F-crítico de 2,7587.

Grupo de verificação	F	Relevância
CPIII-07d	2,1991	Não significativo
CPIII-28d	10,2383	Significativo
CPIII-91d	12,2620	Significativo
CPV-07d	22,6942	Significativo
CPV-28d	4,0591	Significativo
CPV-91d	1,1864	Não significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se verificar a influência dos traços estudados em uma mesma idade, identificou-se que as amostras CPIII-07d e CPV-91d não apresentaram diferença significativa entre os dados, uma vez que o valor de F foi inferior ao de F-crítico, dessa forma, entre os respectivos grupos, é possível afirmar que todos os traços tiveram resistência estatisticamente equivalentes. Já para os demais, onde o valor de F foi superior ao F-crítico, há pelo menos um traço que difere dos outros no grupo de estudo. Devido a esse fato, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se nas Tabela 37 e Tabela 38.

**Tabela 37:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a resistência à compressão em virtude do traço.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-28d	Não se aplica	≠	≠	≡	≡
III-20-1-28d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-28d			Não se aplica	≡	≠
III-20-2-28d				Não se aplica	≡
III-40-2-28d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≠	≠	≠
III-40-1-91d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-91d				Não se aplica	≠
III-40-2-91d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 38:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, sendo avaliado a resistência à compressão em virtude do traço.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1-7d	Não se aplica	≠	≡	≠	≠
V-20-1-7d		Não se aplica	≠	≡	≠
V-40-1-7d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-7d				Não se aplica	≠
V-40-2-7d					Não se aplica
V-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≡	≡
V-20-1-28d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-28d			Não se aplica	≠	≡
V-20-2-28d				Não se aplica	≡
V-40-2-28d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a idade de 28 dias, as argamassas produzidas com CPIII-RS, apresentaram diferença entre a referência (III-R-1) e III-20-1 e III-40-1; III-20-1 e III-20-2 e III-40-1 e III-40-2. No primeiro caso, as amostras com resíduo apresentaram resistência superior a referência, sendo esse aumento de aproximadamente 15,0% e 10,3%, para os traços III-20-1 e III-40-1, respectivamente. Enquanto no segundo caso, verificou que a presença da água adicional nos traços III-20-2 e III-40-2 levou a uma diminuição da resistência de 10,3% e 14,9%, respectivamente, comparado com a amostra III-20-1.

Por último, a presença da água adicional também promoveu uma diminuição da resistência, visto que essa é a única diferença entre as amostras III-40-1 e III-40-2. Essa diminuição foi de aproximadamente 11,3%. Para as amostras com 28 dias, os resultados sugerem que presença do resíduo de construção não promoveu uma diminuição das propriedades mecânicas, como observado em alguns trabalhos na literatura, mas sim, um pequeno aumento. O que mais impactou os resultados nessa idade foi a presença de água adicional.

Já para as amostras com 91 dias, as diferenças foram entre III-R-1 e III-40-2; III-20-1 e III-40-1 e III-20-2 e III-40-2; III-20-2 e III-40-2. No comparativo entre a referência e a amostra com 40% de substituição de resíduo acrescido água, verificou-se uma diminuição na resistência mecânica em 18,5%. No segundo caso, a presença adicional de resíduo e de água, também levaram uma diminuição da resistência, sendo o efeito do acréscimo de água no traço III-20-1, similar ao efeito do acréscimo adicional de resíduo. Para essas duas comparações, a redução na resistência foi de 11,3% e 13,6%. O mesmo efeito foi observado no último caso, onde encontrou uma redução de 12,7% entre as amostras III-20-2 e III-40-2. O que se observado de modo geral é que a presença do resíduo em menores quantidades (20% de substituição) não provou efeito negativo para as argamassas produzidas com CP-III-RS, entretanto a medida que essa substituição aumenta, os efeitos de redução da propriedade mecânica começam a serem observados. Entretanto, o que mais contribuição para redução da resistência foi o acréscimo de água para se atingir a consistência desejada nesse estudo.

No que se refere as amostras com CPV-ARI, aos 7 dias, observou uma diferença entre as amostras de referência (V-R-1) e V-20-1 e V-20-2 e V-40-2; V-20-1 e V-40-1 e V-40-2; V-40-1 e V-20-2 e V-40-2; V-20-2 e V-40-2. Para o primeiro caso, temos que a presença dos agregados reciclados e da água adicional promoveu uma redução da resistência. Essa redução foi mais intensa para as amostras em que ambos os fatores estavam presentes, sendo essa redução de 9,6% da amostra V-40-1 e 17,8% da amostra V-40-2. Fato similar foi observado nos comparativos da V-20-1 com V-40-2, onde essa redução foi de 10,5%. O mesmo ocorreu para V-40-1, que teve uma resistência superior as amostras V-20-2 e V-40-2, sendo essa diferença maior para o

caso com mais quantidade de agregado reciclado, próximo de 21,1%. Por último, essa diminuição da resistência entre as amostras V-20-2 e V-40-2 foi de 10%. Nas primeiras idades, observou que a presença do agregado reciclado promoveu uma diminuição da resistência, sendo essa diminuição mais acentuada para os traços que se fez o uso de água adicional.

Já para as amostras com 28 dias, essa diferença entre traços diminuiu e ficou apenas entre V-40-1 e V-20-2, sendo uma redução de 13,1%. Com o passar do tempo, as diferenças existentes na resistência a compressão, nos traços estudados, foram deixando de existir, até que aos 91 dias todas as amostras são estatisticamente equivalentes.

Dessa forma geral, pode-se entender que para os cimentos com hidratação mais lenta (CPIII-RS), onde há uma maior demanda por água ao longo do processo de hidratação, o agregado reciclado atuou como agente de cura interna. A água reservada em seu interior foi liberada ao longo da hidratação de modo a intensificar esse processo. Isso refletiu em uma aceleração do aumento da resistência mecânica. Com o passar do tempo, a água disponível passou a ser consumida e o processo de hidratação continuou normalmente até que a amostra de referência se equivalesse às amostras III-20-1 e III-40-1. Já no caso do CPV-ARI, onde a hidratação acontece de forma acelerada nas primeiras idades, observou-se que a quantidade de água retida pela amostra com 20% de agregado reciclado não foi suficiente para suprir essa elevada demanda de água inicial, resultando em uma diminuição na resistência. Já a amostra com 40% do agregado reciclado, por conter maior capacidade de absorver água, conseguiu suprir essa elevada demanda inicial, o que refletiu em uma resistência mecânica equivalente à referência.

A redução da resistência a compressão de argamassas produzidas com agregado reciclado é bem documentada na literatura. Cartuxo *et al.* (2015), Tahar *et al.* (2017), Pedro *et al.* (2017) e Medijigbodo *et al.* (2018) são apenas alguns exemplos onde esse fato foi observado. É consenso que a redução nas propriedades mecânicas é proporcional a quantidade de agregado reciclado utilizado, estando essa perda

correlacionadas com a menor rigidez dos agregados reciclados, sua maior absorção e a existência de uma dupla zona de transição.

Para teores inferiores a 30%, observa que o agregado reciclado não reduz significativamente a resistência. Esse fato foi observado por Lotfy *et al.* (2015) e Vieira *et al.* (2016). O primeiro encontrou que os valores de resistência a compressão foram estatisticamente equivalentes a referência, enquanto o último encontrou uma redução de apenas 1,7% e 4,4% entre a amostra de referência e a com 20% e 50% de agregado reciclado, respectivamente, para idade de 56 dias. Uma possível explicação para esse fenômeno é a ocorrência de cura interna, dados que os corpos de prova desse trabalho não foram curados em ambientes onde havia saturação de água. Dessa forma, a água absorvida durante o emassamento pode ter sido liberada e proporcional uma hidratação mais prolongada e densificando a matriz cimentícia.

### 5.5 Carbonatação dos compósitos cimentícios

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios do ensaio de carbonatação acelerada, para as argamassas produzidas CPIII-32-RS e CPV-ARI, tanto com agregados naturais, quanto reciclados. Os resultados das medições da profundidade de carbonatação para as idades de 28, 56 e 91 dias, estão na Tabela 39.

**Tabela 39:** Profundidade de carbonatação das argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI.

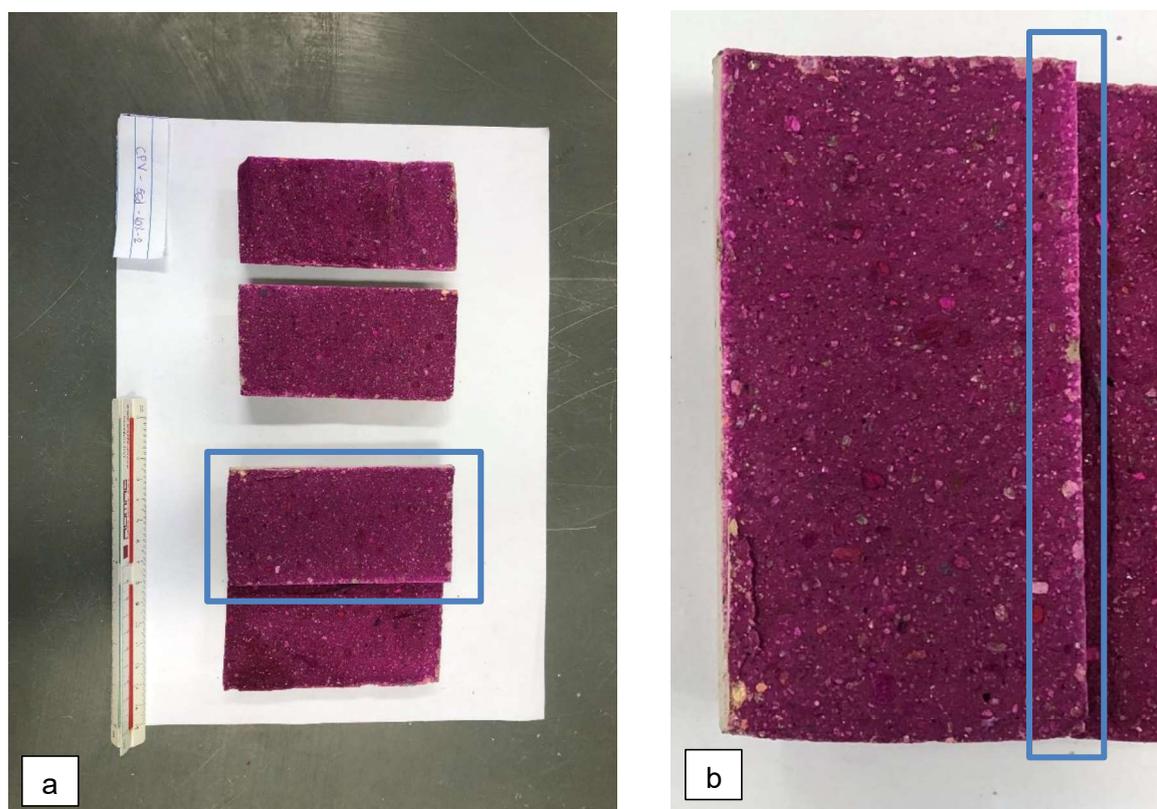
Amostra	Profundida de carbonatação (mm)		
	28 dias	56 dias	91 dias
III-R-1	8,74 ± 1,11	10,49 ± 1,11	11,69 ± 1,69
III-20-1	7,10 ± 1,51	10,45 ± 1,70	11,67 ± 1,80
III-40-1	10,82 ± 1,68	10,92 ± 1,42	12,67 ± 3,19
III-20-2	11,64 ± 2,47	15,47 ± 2,24	16,34 ± 1,59
III-40-2	13,21 ± 2,44	18,36 ± 1,62	19,73 ± 2,37
V-R-1	0	0	0
V-20-1	0	0	0
V-40-1	0	0	0
V-20-2	0	0	1,71 ± 0,42 *
V-40-2	0	0	1,94 ± 0,45 *

\* Média de apenas de alguns pontos, visto que não há uma frente de carbonatação bem definida.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No caso das amostras com CPV-ARI, não foi observada frente de carbonatação para a maioria dos traços avaliados. Na Figura 33-b, é possível identificar um começo de alteração na tonalidade, evidenciado por um roxo mais claro. Apesar dessa alteração de cor, não é possível observar uma frente incolor na amostra, o que indicaria a ocorrência de carbonatação, por esse motivo, foi considerado que não houve carbonatação para os traços onde apenas observou-se esse tipo de alteração.

**Figura 33:** a) Carbonatação do traço CPV-40-2, com exposição de 56 dias dentro da câmara de carbonatação. b) Indício de começo da carbonatação.

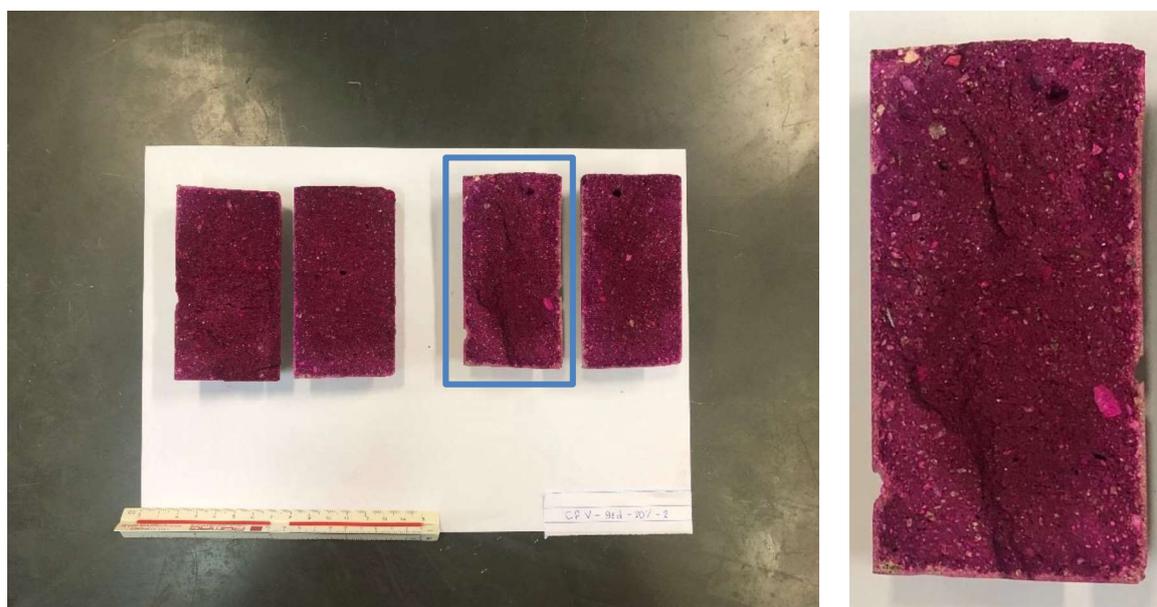


Fonte: Acervo do autor.

Após 91 dias de ensaio, foi possível observar para os traços V-20-2 e V-40-2 o início da carbonatação. Entretanto, diferente do que foi testemunhado nos corpos de prova produzidos com CPIII-RS, a carbonatação aconteceu de forma não uniforme, sendo observada em apenas uma das fases do corpo de prova. Dessa forma, a média representada na Tabela 39 são de medição apenas desse lado.

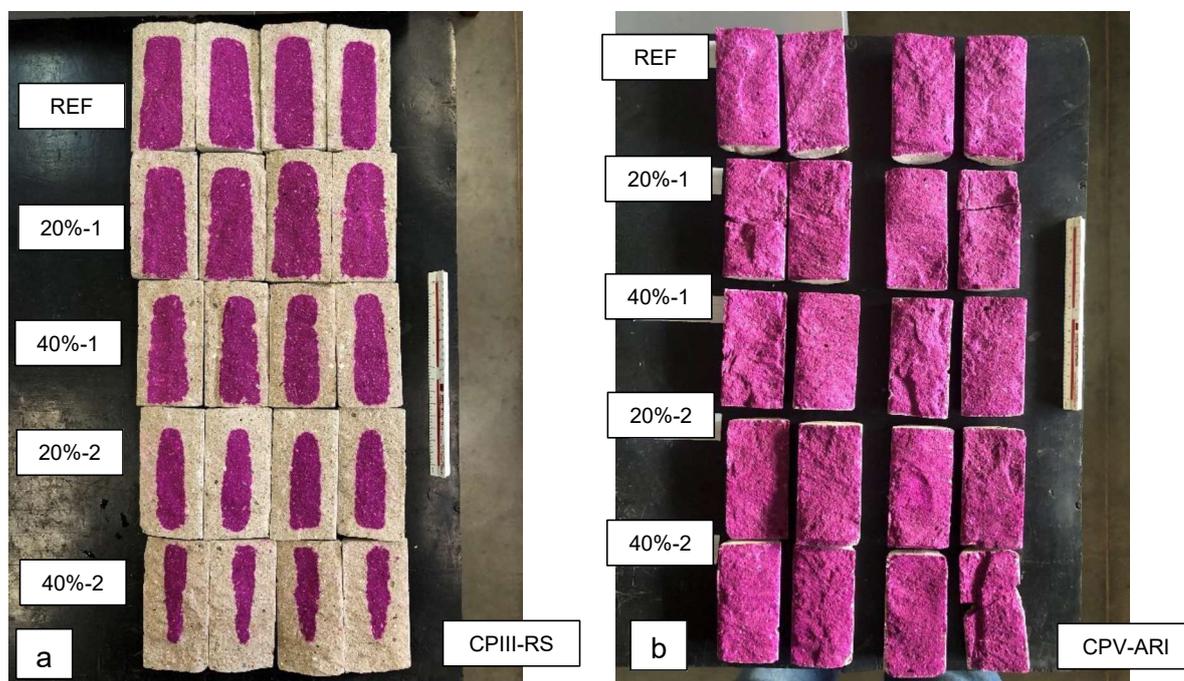
Na Figura 35-a, b, tem-se os aspectos dos corpos de prova, que ficaram imersos na câmara de carbonatação por 91 dias, após a realização do ensaio. Enquanto as amostras com CPIII-RS apresentaram carbonatações significativas, isso não foi observado para a com CPV-ARI. Isso se deve ao fato de que o cimento CPV-ARI possui elevada reserva alcalina (teor clínquer + sulfato de cálcio é entre 90-100%), além das argamassas apresentarem menores valores de absorção (por capilaridade e imersão) e de índice de vazios, o que dificulta o avanço da frente de carbonatação. Mesmo com tempos e concentrações de CO<sub>2</sub> elevados de exposição, a formação de uma frente carbonatada foi praticamente insignificante para essas amostras.

**Figura 34:** a) Carbonatação do traço CPV-40-2, com exposição de 91 dias dentro da câmara de carbonatação. b) Frente de carbonatação, não uniforme.



Fonte: Acervo do autor.

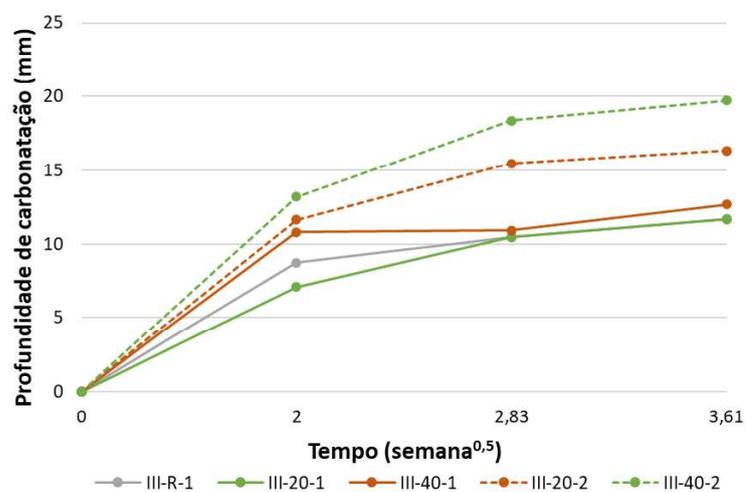
**Figura 35:** a) Corpos de prova, produzidos com CPIII-RS, submetidos a carbonatação por 91 dias. b) Corpos de prova, produzidos com CPV-ARI, submetidos a carbonatação por 91 dias.



Fonte: Acervo do autor.

Considerando que não foi possível análises mais detalhadas das amostras com CPV-ARI, os resultados do avanço da frente de carbonatação para o CP III-RS podem ser observados na Figura 36.

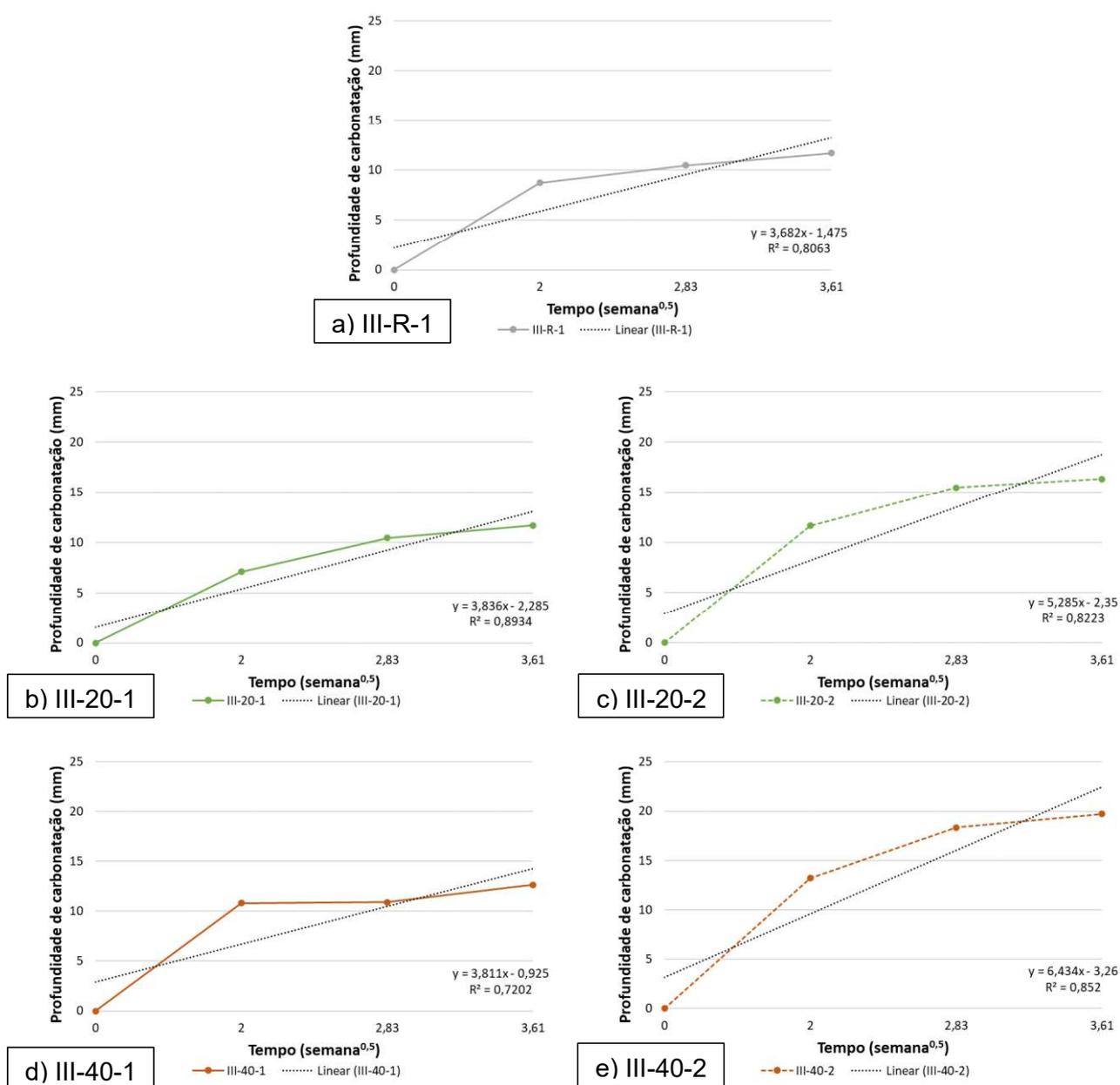
**Figura 36:** Evolução da frente de carbonatação para argamassas produzidas com CPIII-RS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que todas as amostras apresentaram comportamento semelhante, sendo que à medida que o tempo de exposição a atmosfera concentrada em CO<sub>2</sub> avança, menor é a inclinação da reta. Em especial, a partir do terceiro ponto (idade de 56 dias), as amostras III-R-1, III-20-1 e III-40-1 apresentaram valores muito próximos. A Figura 37 apresenta as regressões lineares utilizadas para determinação dos coeficientes de carbonatação acelerada ( $K_a$ ) das amostras estudadas.

**Figura 37:** Regressões lineares das curvas de evolução de carbonatação acelerada para argamassas produzidas com CPIII-RS, sendo a) III-R-1, b) III-20-1, c) III-20-2, d) III-40-1 e e) III-40-2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores dos coeficientes de carbonatação acelerada ( $K_a$ ), em  $\text{mm/semana}^{0,5}$ , obtidos a partir da inclinação das regressões lineares da Figura 37, estão listados na Tabela 40. Também são apresentadas as respectivas classificações quanto à resistência dos compósitos frente à carbonatação para ambientes urbanos (Tabela 8), segundo Ribeiro *et al.* (2021).

**Tabela 40:** Coeficiente de carbonatação acelerada e classificação quanto a resistência a carbonatação das argamassas produzidas com CPIII-RS.

Amostras	$K_a$ ( $\text{mm/semana}^{0,5}$ )	Classificação
III-R-1	3,682	Moderada resistência
III-20-1	3,836	Baixa resistência
III-40-1	3,811	Baixa resistência
III-20-2	5,285	Muito baixa resistência
III-40-2	6,434	Muito baixa resistência

Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo esse critério, a amostra III-R-1 pode ser classificada com moderada resistência à carbonatação, enquanto as amostras III-20-1 e III-40-1 estão na faixa de baixa resistência à carbonatação. Por último, as argamassas III-20-2 e III-40-2 estão na faixa de muito baixa resistência. Cabe mencionar que as argamassas com fator  $a/c$  igual a 0,42, independente da presença ou não do agregado reciclado, estão muito próximas dos limites do intervalo e que o coeficiente foi calculado para uma curva média das amostras.

Para avaliação estatística dos resultados, foi realizado ANOVA de forma a verificar a influência do traço adotado na profundidade de carbonatação. A análise estatística foi realizada apenas para as amostras com CPIII-RS, dado que não foi observado carbonatação aparente nos traços com CPV-ARI.

**Tabela 41:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS, sendo avaliado a profundidade de carbonatação. Valor de F-crítico de 2,4506.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPIII-28d	2,4506	36,2477	Significativo
CPIII-56d	2,4506	97,0289	Significativo
CPIII-91d	2,4506	68,1631	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os grupos de estudo, observou os valores de F superiores ao F-crítico, indicando que para todos os casos há diferença significativa entre as amostras dos grupos de estudo. Em seguida, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se na Tabela 42.

Para a idade de 28 dias, observou diferença entre todos os traços, exceto entre III-40-1 e III-20-2, sendo estes considerado estatisticamente similares entre si. Comparado a referência (III-R-1) com os grupos III-40-1, III-20-2 e III-40-2, tem-se um aumento da carbonatação de 23,8%, 33,1% e 51,0%, respectivamente. Já quando comprado III-20-1 temos que a presença do agregado reciclado levou a uma diminuição de 18,8% da frente de carbonatação.

**Tabela 42:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 28, 56 e 91 dias, sendo avaliado a profundidade de carbonatação.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-28d	Não se aplica	≠	≠	≠	≠
III-20-1-28d		Não se aplica	≠	≠	≠
III-40-1-28d			Não se aplica	≡	≠
III-20-2-28d				Não se aplica	≠
III-40-2-28d					Não se aplica
III-R-1-56d	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
III-20-1-56d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-56d			Não se aplica	≠	≠
III-20-2-56d				Não se aplica	≠
III-40-2-56d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≠	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-91d			Não se aplica	≠	≠
III-20-2-91d				Não se aplica	≠
III-40-2-91d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se analisar a idade de 56 dias, tem-se diferenças estatisticamente relevantes entre os grupos III-R-1 e III-20-2 e III-40-2; III-20-1 e III-20-2 e III-40-2; III-40-1 e III-20-2 e III-40-2; III-20-2 e III-40-2. Para o primeiro caso, a substituição dos agregados naturais

pelo reciclado, juntamente com o acréscimo de água de amassamento, promoveu um avanço da frente de carbonatação de 47,5% e 75,1%, respectivamente. No segundo caso também foram observado esse mesmo comportamento, sendo que as amostras com III-20-2 e III-40-2 tiveram uma carbonatação superior em 32,6% e 57,4% que a amostra III-20-1, indicando que apenas a adição adicional do agregado reciclado (III-40-1), não é suficiente para promover uma diferença estatísticas dos resultados. O mesmo efeito foi observado no caso seguinte, onde esses aumentos foram de 41,6% e 68,1%, quando comparados os valores de III-20-2 e III-40-2 com III-40-1. No último caso, ao se comparar as amostras III-20-2 e III-40-2 temos um aumento de 18,7% da frente de carbonatação. Vale ressaltar que além da diferença da quantidade de agregado reciclado a mais, o traço III-40-2 tem uma relação a/c superior em 0,01. Das amostras comparadas essa é a menor diferença observada na frente de carbonatação entre duas amostras.

Para a idade de 91 dias foi observado um comportamento similar das amostras de 56 dias, sendo que as amostras com relação a/c de 0,42 diferiram das amostras com onde se fez uso de água adicional. A Tabela 43 traz o resumo desses aumentos.

**Tabela 43:** Aumento percentual da frente de carbonatação, para corpos de prova produzidos com CPIII-RS, submetidos a câmara de carbonatação por 91 dias.

Amostra	III-20-2	III-40-2
III-R-1-91d	39,8%	68,8%
III-20-1-91d	56,4%	88,8%
III-40-1-91d	29,0%	55,8%
III-20-2-91d	Não se aplica	20,7%
III-40-2-91d		Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, para exposições mais prolongadas, identificou-se que a presença dos agregados reciclados não promoveu um aumento da frente de carbonatação quando comparados com a referência. Entretanto fica claro, ao analisar as idades de 28 dias, que a quantidade desse material no traço influencia a profundidade da frente de carbonatação, sendo esse aumento proporcional a quantidade de agregado reciclado utilizado. O que promoveu a maior influência nessa propriedade foi o acréscimo de água. O que torna a mistura mais porosa e absorvente, fato esse constatado nesse

trabalho, dado que os traços que apresentaram maior avanço da frente de carbonatação foram os com maiores índices de absorção por imersão e capilaridade.

Para Silva *et al.* (2015), Guo *et al.* (2018) e Bravo *et al.* (2018), a resistência à carbonatação é uma das propriedades que mais é alterada em função da presença do agregado reciclado. Bravo *et al.* (2018) relataram que para substituições de 100% do agregado natural pelo reciclado, a frente de carbonatação pode chegar a ser 205% superior a referência, quando se utilizado o agregado reciclado em conjunto a aditivos superplastificantes. Para Guo *et al.* (2018) à medida que a frente de carbonatação aumenta, mais difícil é para essa continuar avançando. Como para todos os traços com CPIII-RS, a frente de carbonatação foi expressiva, superior a 10mm, esse pode ser um os motivos para os traços com agregados reciclados, onde não se fez uso da água adicional, não serem estatisticamente diferentes da referência.

Para essas amostras de CPV-ARI, não foi realizado esse tipo de análise estatística, uma vez que para as idades de 91 dias não foi observado uma frente de carbonatação bem definida. Mesmo com a incorporação de agregados reciclados mais porosos e com maiores teores de relação a/c, a reserva alcalina do cimento CPV-ARI foi suficiente em manter a durabilidade e a resistência desses compósitos contra ao ataque de CO<sub>2</sub>.

## **5.6 Retração dos compósitos cimentícios**

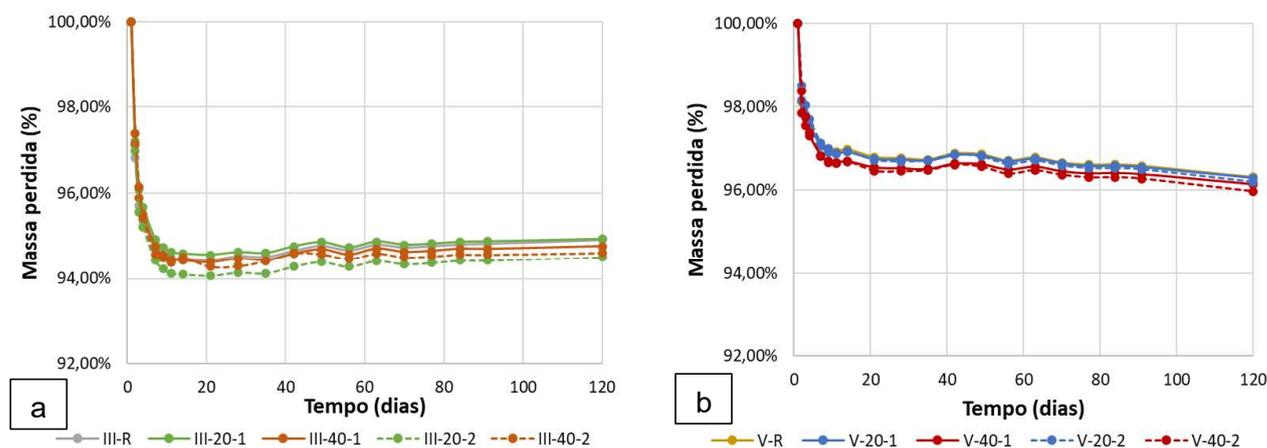
A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de retração por secagem e retração autógena, para as argamassas produzidas CPIII-32-RS e CPV-ARI, tanto com agregados naturais, quanto reciclados, em um período de 120 dias.

### **5.6.1 Retração por secagem**

Os resultados da perda de massa durante o ensaio de retração por secagem, tanto para as amostras produzidas com CPIII-RS, quanto para as amostras com CPV-ARI, estão apresentados na Figura 38. Em ambos os casos, percebe-se que nas primeiras idades a perda de massa acontece de forma mais acelerada, sendo que após o 14º

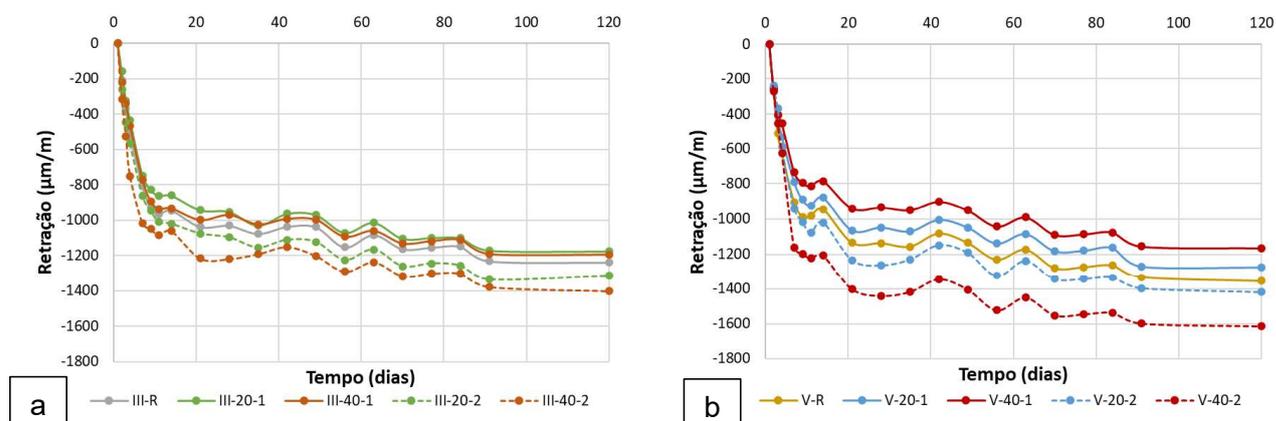
dia já não há grandes mudanças, tendo as curvas um comportamento quase constante. É evidente que a perda de massa das amostras produzidas com CIII-RS são superiores as amostras com CPV-ARI, durante todo o período do ensaio. Isso se deve em função da dinâmica de hidratação dos cimentos, enquanto o cimento CIII-RS possui uma hidratação mais lenta, o CPV-ARI reage rapidamente. Em virtude disso, o primeiro tem água disponível que é evaporada, causando uma maior variação da massa dos corpos de prova. Além disso, tem-se o fato de que as amostras produzidas com CIII-RS apresentaram porosidade superior as produzidas com CPV-AR (um aumento de aproximadamente 50%), o que facilita a evaporação da água.

**Figura 38:** Evolução da perda de massa das argamassas, durante o ensaio de retração por secagem. a) CIII-RS; b) CPV-ARI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da retração por secagem, tanto para as amostras produzidas com CIII-RS, quanto para as amostras com CPV-ARI, estão apresentados na Figura 39.

**Figura 39:** Retração por secagem das argamassas. a) CPIII-RS; b) CPV-ARI.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou que independentemente do tipo de cimento utilizado, as curvas de retração por secagem apresentam comportamentos semelhantes, sendo a retração mais intensa nas primeiras idades. Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA para os dois grupos de estudo, nas idades 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias. Na Tabela 44 tem-se o resumo do ANOVA.

**Tabela 44:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a retração por secagem.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPIII-07d	3,4780	10,8722	Significativo
CPIII-14d	3,4780	4,6111	Significativo
CPIII-28d	3,4780	9,6119	Significativo
CPIII-56d	3,4780	9,3040	Significativo
CPIII-91d	3,4780	10,2752	Significativo
CPIII-120d	3,4780	10,8939	Significativo
CPV-07d	3,4780	26,5803	Significativo
CPV-14d	3,4780	34,4197	Significativo
CPV-28d	3,4780	25,8959	Significativo
CPV-56d	3,4780	20,9361	Significativo
CPV-91d	3,4780	12,9525	Significativo
CPV-120d	3,4780	11,3255	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os grupos de estudo, observou os valores de F superiores ao F-crítico, indicando que para todos os casos há diferença significativa entre as amostras dos grupos de estudo. Em seguida, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se nas Tabela 45 e Tabela 46.

Para a idade de 7 dias, observou que todos os traços só diferem entre si quando comparado com III-40-2. Para este caso, as amostras III-R-1, III-20-1, III-40-1 e III-20-2, retraíram 20,4%, 26,5%, 24,1% e 15,0% menos que a III-40-2, respectivamente. Já aos 14 dias, só foi identificado diferença estatisticamente relevante entre III-20-1 e III-40-2. Nesse caso, a amostra com maior quantidade de agregado reciclado e água retraiu 18,9% a mais.

Já para a idade de 28 dias, as amostras também só apresentaram valores estatisticamente diferentes quando comparadas com III-40-2. Nessa idade os traços III-R-1, III-20-1 e III-40-1, retraíram menos, sendo essa retração de 15,5%, 21,9% e 20,4% menor que a amostra III-40-2, respectivamente. Para os corpos de prova submetidos a retração por 56 dias, foi encontrado diferença entre os traços III-20-1 e III-20-2 e III-40-2; e III-40-1 e III-40-2. Para o primeiro caso, as amostras com acréscimo de água retraíram 14,5% e 20,6% a mais que III-20-1. Já para o último caso, a diferença foi entre III-40-1 e III-40-2, sendo a amostra com mais água aquela que mais retraiu (18,1% a mais).

**Tabela 45:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração por secagem.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-7d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-7d		Não se aplica	≡	≡	≠
III-40-1-7d			Não se aplica	≡	≠
III-20-2-7d				Não se aplica	≠
III-40-2-7d					Não se aplica
III-R-1-14d	Não se aplica	≡	≡	≡	≡
III-20-1-14d		Não se aplica	≡	≡	≠
III-40-1-14d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-14d				Não se aplica	≡
III-40-2-14d					Não se aplica
III-R-1-28d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-28d		Não se aplica	≡	≡	≠
III-40-1-28d			Não se aplica	≡	≠
III-20-2-28d				Não se aplica	≡
III-40-2-28d					Não se aplica
III-R-1-56d	Não se aplica	≡	≡	≡	≡
III-20-1-56d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-56d			Não se aplica	≡	≠
III-20-2-56d				Não se aplica	≡
III-40-2-56d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-91d			Não se aplica	≠	≠
III-20-2-91d				Não se aplica	≡
III-40-2-91d					Não se aplica
III-R-1-120d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
III-20-1-120d		Não se aplica	≡	≠	≠
III-40-1-120d			Não se aplica	≡	≠
III-20-2-120d				Não se aplica	≡
III-40-2-120d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 46:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração por secagem.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1-7d	Não se aplica	≡	≠	≡	≠
V-20-1-7d		Não se aplica	≡	≠	≠
V-40-1-7d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-7d				Não se aplica	≠
V-40-2-7d					Não se aplica
V-R-1-14d	Não se aplica	≡	≠	≡	≠
V-20-1-14d		Não se aplica	≡	≠	≠
V-40-1-14d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-14d				Não se aplica	≠
V-40-2-14d					Não se aplica
V-R-1-28d	Não se aplica	≡	≠	≡	≠
V-20-1-28d		Não se aplica	≡	≠	≠
V-40-1-28d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-28d				Não se aplica	≡
V-40-2-28d					Não se aplica
V-R-1-56d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
V-20-1-56d		Não se aplica	≡	≡	≠
V-40-1-56d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-56d				Não se aplica	≠
V-40-2-56d					Não se aplica
V-R-1-91d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
V-20-1-91d		Não se aplica	≡	≡	≠
V-40-1-91d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-91d				Não se aplica	≡
V-40-2-91d					Não se aplica
V-R-1-120d	Não se aplica	≡	≡	≡	≠
V-20-1-120d		Não se aplica	≡	≡	≠
V-40-1-120d			Não se aplica	≠	≠
V-20-2-120d				Não se aplica	≡
V-40-2-120d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já o grupo com idades de 91 dias, foram observados valores distintos entre a III-20-1 e III-40-1 quando comparados com III-20-2, e entre III-R-1, III-20-1 e III-40-1 quando comparados com III-40-2. No caso das amostras comparadas com III-20-2, identificou-se uma retração de 12,3% e 10,8% menor para os traços III-20-1 e III-40-1. Já no comparativo com III-40-2, essas diferenças foram maiores, sendo de 10,5%, 15,0% e 13,4% para as amostras III-R-1, III-20-1 e III-40-1, respectivamente. Resultados similares foram observados para os corpos de prova com 120 dias. Nesse caso, as diferenças ficaram entre III-20-1 e III-20-2 e dos traços III-R-1, III-20-1 e III-40-1 com III-40-2. No primeiro caso, a adição de água levou a um aumento da retração de 11,9% em relação aos traços III-20-1 e III-20-2. Já no comparativo com III-40-2, sua retração foi superior em 13,0%, 19,1% e 17,2% quando comparado com os traços III-R-1, III-20-1 e III-40-1, respectivamente.

Em todos os casos, as diferenças foram observadas sempre entre alguma amostra e aquela com acréscimo de água. Em nenhum caso foi observado diferença estatística entre a referência e os traços contendo agregado reciclado que não se fez uso de água adicional. Apesar disso, os traços contendo agregado reciclado no teor de 40%, onde se fez o maior uso de água adicional, apresentou os maiores teores de retração por secagem para os traços produzidos com CPIII-RS.

Referente as amostras com CPV-ARI, os corpos de prova com idade de 7, 14 e 28 dias, apresentaram diferenças na retração por secagem nos mesmos grupos, sendo que os traços V-R-1, V-20-1, V-40-1; V-20-2 apresentaram retração inferior a amostra V-40-2. A única exceção desse conjunto foi entre V-20-2 e V-40-2 para a idade de 28 dias, onde se identificou que as retrações são estatisticamente semelhantes. Também se observou uma diferença entre as amostras V-20-1 e V-40-1 comparadas e V-20-2, onde a amostra com acréscimo de água apresentou maior retração por secagem. Por último observou diferença entre as amostras V-R-1 e V-40-1 onde a amostra com agregado reciclado apresentou menor retração. As diferenças percentuais entre as retrações por secagem dos diversos grupos estão detalhadas na Tabela 47.

**Tabela 47:** Detalhamento da retração por secagem, para as argamassas produzidas com CPV-ARI, para as idades de 7, 14 e 28 dias.

<b>Amostra</b>	<b>V-40-1</b>	<b>V-20-2</b>	<b>V-40-2</b>
<b>V-R-1-7d</b>	31,8%	≡	-19,4%
<b>V-20-1-7d</b>	≡	-9,5%	-25,8%
<b>V-40-1-7d</b>	Não se aplica	-25,4%	-38,9%
<b>V-20-2-7d</b>		Não se aplica	-18,0%
<b>V-40-2-7d</b>			Não se aplica
<b>V-R-1-14d</b>	20,4%	≡	-21,7%
<b>V-20-1-14d</b>	≡	-13,8%	-27,1%
<b>V-40-1-14d</b>	Não se aplica	-23,1%	-35,0%
<b>V-20-2-14d</b>		Não se aplica	-15,5%
<b>V-40-2-14d</b>			Não se aplica
<b>V-R-1-28d</b>	17,9%	≡	-19,2%
<b>V-20-1-28d</b>	≡	-13,9%	-25,3%
<b>V-40-1-28d</b>	Não se aplica	-21,1%	-31,5%
<b>V-20-2-28d</b>		Não se aplica	≡
<b>V-40-2-28d</b>			Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o caso da referência, identificou que essa retraiu mais que a amostra V-40-1, sendo essa diferença mais expressiva nas primeiras idades, e caindo gradualmente com passar do tempo, atingindo uma retração superior em 17,9% aos 28 dias. Já ao compararmos com a amostra V-40-2, temos que o traço V-R-1 retraiu menos. Sendo essa retração não alterou significativamente com o passar do tempo.

Quando se analisa V-20-1, percebe-se que o acréscimo de água levou a um aumento da retração da secagem, sendo esse aumento praticamente o mesmo para as idades de 14 e 28 dias. Quando se compara o traço V-20-1 com V-40-2, percebe-se que o último apresenta uma retração significativamente superior, na ordem de 25%.

Ao comparar os resultados de V-40-1, identifica-se que esse retraiu menos que a amostra V-20-2. Sendo essa diminuição superior a observado para o comparativo V-20-1 e V-20-2. Um dos possíveis motivos é que a presença adicional do agregado promoveu uma redução da relação  $a/c_e$ . Devido a esse fenômeno, nesse traço há uma menor quantidade de água livre, principal responsável pela retração por secagem. Esse pode ser um dos motivos que levou as amostras com 40% do agregado

reciclado, sem acréscimo de água, apresentarem os menores índices de retração do grupo de estudado.

Já para o traço V-20-2, só observou diferença entre o grupo V-40-2 nas idades de 7 e 14 dias, sendo que a diferença percentual da retração diminuiu com o passar do tempo, já sendo considerado estatisticamente similar aos 28 dias. Assim como observado para as idades iniciais, as amostras com maior quantidade de água apresentaram maior retração por secagem. As diferenças percentuais entre as retrações por secagem dos diversos grupos estão detalhadas na Tabela 48.

**Tabela 48:** Detalhamento da retração por secagem, para as argamassas produzidas com CPV-ARI, para as idades de 56, 91 e 120 dias.

Amostra	V-20-2	V-40-2
V-R-1-56d	≡	-19,2%
V-20-1-56d	≡	-25,3%
V-40-1-56d	-21,1%	-31,5%
V-20-2-56d	Não se aplica	-13,2%
V-40-2-56d		Não se aplica
<hr/>		
V-R-1-91d	≡	-16,7%
V-20-1-91d	≡	-20,7%
V-40-1-91d	-17,2%	-27,7%
V-20-2-91d	Não se aplica	≡
V-40-2-91d		Não se aplica
<hr/>		
V-R-1-120d	≡	-16,1%
V-20-1-120d	≡	-21,2%
V-40-1-120d	-17,9%	-27,8%
V-20-2-120d	Não se aplica	≡
V-40-2-120d		Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as amostras com 56 dias, observou que aquelas com agregado reciclado, sem acréscimo de água, apresentaram os menores valores de retração, sendo que à medida que a quantidade de agregado reciclado, menor é a retração. Esse fato já havia sido observado para as idades com até 28 dias.

Nas idades mais avançadas, 91 e 120 dias, não houve diferença significativa dos valores de retração, indicando que retração no corpo de prova havia praticamente

cessado. Nesse caso, os traços V-20-1 e V-40-2 retraíram 21,2% e 27,8% menos que a amostra com V-40-2, respectivamente.

De forma geral, os agregados reciclados, independentemente do tipo de cimento utilizado, não afetaram significativamente a retração por secagem, podendo ser considerado semelhantes as referências. As diferenças foram observados nos traços onde se fez uso de água adicional, especialmente no traço contendo 40% de agregado reciclado, acrescido de água. Esse traço apresentava um teor de a/c de 0,45, podendo essas diferenças serem atribuídas a esse fato.

É relato por Cartuxo *et al.* (2015), Vieira *et al.* (2016), Xuan *et al.* (2017), Medjigbodo *et al.* (2018) e Bravo *et al.* (2018) que a presença do agregado reciclado promove um aumento da retração por secagem. Os autores justificam esse aumento, majoritariamente por causa de dois fatores: menor rigidez dos agregados reciclados e maior consumo de água para se atingir determinada consistência. Esse fato foi observado nesse trabalho. O agregado reciclado por si só não alterou a retração, mas a fim de garantir que as argamassas com agregado reciclado estivesse no intervalo de consistência da referência, foi necessário acrescentar água na mistura, dada a natureza porosa do agregado reciclado. Fato esse que levou a um aumento da retração por secagem. Nos traços em que se fez uso de água adicional, Cartuxo *et al.* (2015) e Bravo *et al.* (2018) encontraram uma retração 57% e 103,8% de acréscimo na retração por secagem, respectivamente. Cabe mencionar que à medida que a quantidade de agregado reciclado na mistura aumenta, maior é a necessidade do acréscimo de água, e por consequência, maior a retração por secagem.

### 5.6.2 Retração autógena

Os resultados da perda de massa durante o período de ensaio de retração autógena, para ambos os tipos de cimento utilizados, estão apresentados na Tabela 49.

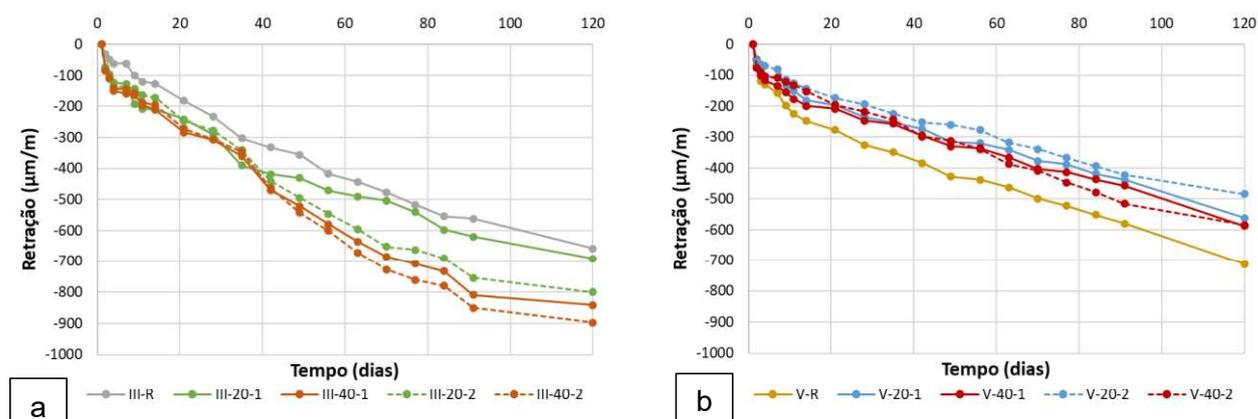
**Tabela 49:** Perda de massa as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, após 120 dias de ensaio.

Grupo de verificação	Perda de massa (%)
III-R-1	99,73 ± 0,01
III-20-1	99,45 ± 0,20
III-40-1	99,53 ± 0,07
III-20-2	99,59 ± 0,06
III-40-2	99,36 ± 0,08
V-R-1	99,79 ± 0,05
V-20-1	99,82 ± 0,05
V-40-1	99,79 ± 0,07
V-20-2	99,85 ± 0,07
V-40-2	99,74 ± 0,09

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou que a metodologia adotada para execução do ensaio foi eficiente em evitar que os corpos de prova perdessem água para o ambiente durante a realização do ensaio. Nas amostras produzidas com CPIII-RS foi onde se observou a maior perda de massa, em especial para as amostras III-40-2, onde essa perda foi de 0,644%. Essa perda foi 8 vezes menor que a observada no ensaio de retração por secagem. Já para as amostras feitas com CPV-ARI, a maior perda também foi na amostra com substituição de 40% da areia natural pela areia reciclada onde se fez uso da água adicional. A perda de massa para V-40-2 foi de 0,257%, o que é quase 16 vezes menor que a massa perdida no ensaio de retração por secagem.

A Figura 40 apresenta o resultado do ensaio de retração autógena para as argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI.

**Figura 40:** Retração autógena das argamassas. a) CPIII-RS; b) CPV-ARI.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ambos os tipos de argamassa, observa-se um aumento da retração autógena com o passar do tempo, sendo maior a retração autógena nos traços com CPIII-RS. Esse resultado foi justamente o inverso da retração por secagem, onde os traços com CPV-ARI retraíram mais. Para avaliação estatística dos resultados foi realizado ANOVA para os dois grupos de estudo, nas idades 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias. Na Tabela 50 tem-se o resumo do ANOVA.

**Tabela 50:** Resumo da ANOVA para as amostras produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, sendo avaliado a retração autógena.

Grupo de verificação	F-crítico	F	Relevância
CPIII-07d	3,4780	14,2237	Significativo
CPIII-14d	3,4780	4,5781	Significativo
CPIII-28d	3,4780	3,2883	Não significativo
CPIII-56d	3,4780	27,6139	Significativo
CPIII-91d	3,4780	59,3805	Significativo
CPIII-120d	3,4780	44,6406	Significativo
CPV-07d	3,4780	13,1036	Significativo
CPV-14d	3,4780	9,3342	Significativo
CPV-28d	3,4780	28,1903	Significativo
CPV-56d	3,4780	26,2719	Significativo
CPV-91d	3,4780	8,1012	Significativo
CPV-120d	3,4780	8,8341	Significativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para todos os grupos de estudo, com exceção do CPIII-28d, observou os valores de F superiores ao F-crítico, indicando que para esses casos há diferença significativa entre as amostras dos grupos de estudo. Em seguida, foi realizado o teste Turkey para verificar quais amostras diferem entre si. Os resultados desses testes encontram-se nas Tabela 51 e Tabela 52.

**Tabela 51:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPIII-RS, com 7, 14, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração autógena.

Amostra	III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-7d	Não se aplica	≠	≠	≠	≠
III-20-1-7d		Não se aplica	≡	≡	≡
III-40-1-7d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-7d				Não se aplica	≡
III-40-2-7d					Não se aplica
III-R-1-14d	Não se aplica	≠	≠	≡	≡
III-20-1-14d		Não se aplica	≡	≡	≡
III-40-1-14d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-14d				Não se aplica	≡
III-40-2-14d					Não se aplica
III-R-1-56d	Não se aplica	≡	≠	≠	≠
III-20-1-56d		Não se aplica	≠	≠	≠
III-40-1-56d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-56d				Não se aplica	≡
III-40-2-56d					Não se aplica
III-R-1-91d	Não se aplica	≡	≠	≠	≠
III-20-1-91d		Não se aplica	≠	≠	≠
III-40-1-91d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-91d				Não se aplica	≠
III-40-2-91d					Não se aplica
III-R-1-120d	Não se aplica	≡	≠	≠	≠
III-20-1-120d		Não se aplica	≠	≠	≠
III-40-1-120d			Não se aplica	≡	≡
III-20-2-120d				Não se aplica	≠
III-40-2-120d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Tabela 52:** Teste Turkey das amostras produzidas com CPV-ARI, com 7, 14, 28, 56, 91 e 120 dias, sendo avaliado a retração autógena.

Amostra	V-R-1	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
V-R-1-7d	Não se aplica	≠	≡	≠	≠
V-20-1-7d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-7d			Não se aplica	≠	≡
V-20-2-7d				Não se aplica	≡
V-40-2-7d					Não se aplica
V-R-1-14d	Não se aplica	≠	≡	≠	≠
V-20-1-14d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-14d			Não se aplica	≡	≡
V-20-2-14d				Não se aplica	≡
V-40-2-14d					Não se aplica
V-R-1-28d	Não se aplica	≠	≠	≠	≠
V-20-1-28d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-28d			Não se aplica	≠	≡
V-20-2-28d				Não se aplica	≡
V-40-2-28d					Não se aplica
V-R-1-56d	Não se aplica	≠	≠	≠	≠
V-20-1-56d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-56d			Não se aplica	≠	≡
V-20-2-56d				Não se aplica	≠
V-40-2-56d					Não se aplica
V-R-1-91d	Não se aplica	≠	≠	≠	≠
V-20-1-91d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-91d			Não se aplica	≡	≡
V-20-2-91d				Não se aplica	≡
V-40-2-91d					Não se aplica
V-R-1-120d	Não se aplica	≠	≠	≠	≠
V-20-1-120d		Não se aplica	≡	≡	≡
V-40-1-120d			Não se aplica	≡	≡
V-20-2-120d				Não se aplica	≡
V-40-2-120d					Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a idade de 7 dias, as argamassas produzidas com CPIII-RS, observou diferença entre todos os traços e a referência. A presença do agregado reciclado promoveu um aumento da retração autógena. Sendo que para os traços III-20-1, III-40-1, III-20-2 e III-40-2, esse aumento foi de 105,8%, 153,4%, 122,3% e 133,4%, respectivamente. Já aos 14 dias, essa diferença entre as amostras diminuiu, ficando apenas entre a referência e as amostras com agregado reciclado que não se fez uso de água adicional. Para o caso do III-20-1 a retração autógena foi maior em 65,3%, enquanto na III-40-1 essa diferença foi de 67,0%. Conforme consta na Tabela 50, não foi observado diferença significativa dos dados para a idade de 28 dias.

Para as idades 56, 91 e 120 dias foi observado um comportamento muito semelhante, sendo a única diferença que para as últimas duas idades, houve diferença significativa entre os traços III-20-2 e III-40-2, enquanto na primeira não. As amostras III-R-1 e III-20-1 diferenciaram estatisticamente dos traços III-40-1, III-20-2 e III-40-2. A Tabela 53 traz o detalhamento das diferenças das retrações entre esses traços.

**Tabela 53:** Diferença da retração autógena, para as argamassas produzidas com CPIII-RS, para as idades de 56, 91 e 120 dias.

Amostra	III-40-1	III-20-2	III-40-2
III-R-1-56d	+28,0%	+23,6%	+30,6%
III-20-1-56d	+18,7%	+13,8%	+21,7%
III-40-1-56d	Não se aplica	≡	≡
III-20-2-56d		Não se aplica	≡
III-40-2-56d			Não se aplica
III-R-1-91d	+30,6%	+25,6%	+33,9%
III-20-1-91d	+23,4%	+17,8%	+27,0%
III-40-1-91d	Não se aplica	≡	≡
III-20-2-91d		Não se aplica	+11,2%
III-40-2-91d			Não se aplica
III-R-1-120d	+21,8%	+17,7%	+26,6%
III-20-1-120d	+17,8%	+13,5%	+22,9%
III-40-1-120d	Não se aplica	≡	≡
III-20-2-120d		Não se aplica	+10,9%
III-40-2-120d			Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se ao longo do ensaio que as amostras com menor valores de retração autógena foram a referência e a III-20-1, sendo que para idades superiores a 28 dias, ambas amostras foram consideradas estatisticamente equivalentes pelo teste Turkey. Também se observou que para os traços com acréscimo de água, o aumento da retração autógena acompanhou o acréscimo do agregado reciclado. Com o passar do tempo, identificou-se uma tendência da redução da diferença entre os traços III-R-1 e III-20-1, quando comparados com III-20-2 e III-40-2.

Para a referência, que apresentou uma retração autógena menor, essa diferença saiu de 28,0%, 23,6% e 30,6% quando comparado com os traços III-40-1, III-20-2 e III-40-2, respectivamente, aos 56 dias para 21,8%, 17,7% e 26,6% aos 120 dias. Já para o traço III-20-1 as diferenças não sofreram alterações significativas.

Já para os traços com CPV-ARI, foi observado um comportamento contrário. Para esse tipo de cimento, a referência apresentou os maiores valores de retração autógena. Com idade de 7 dias, houve diferenças entre V-20-1, V-20-2 e V-40-2 e a referência e também entre V-40-1 e V-20-2. Para o primeiro caso. As amostras com resíduo apresentaram retrações autógenas de 31,1%, 47,7% e 30,5% menor que a referência, respectivamente. Já ao comparamos V-40-1 com V-20-2, temos uma diferença de 18,7%, sendo a amostra com acréscimo de água aquela que menos retraiu.

De forma similar ao observado aos 7 dias, para a idade de 14 dias, foram encontradas diferenças apenas entre V-R-1 e os traços V-20-1, V-20-2 e V-40-2. Para esse caso, as amostras com agregado reciclado retraíram 26,5%, 41,9% e 38,7% a menos.

Para as idades de 28 e 56 dias, foram observadas diferenças entre os mesmos traços, com exceção V-20-2 e V-40-2, onde houve diferença estatística entre os resultados apenas na idade de 56 dias. O resumo das diferenças percentuais nas retrações autógenas está detalhado na Tabela 54.

**Tabela 54:** Diferença da retração autógena, para as argamassas produzidas com CPV-ARI, para as idades de 28 e 56 dias.

Amostra	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
<b>V-R-1-28d</b>	-38,7%	-31,9%	-68,1%	-49,3%
<b>V-40-1-28d</b>	Não se aplica	Não se aplica	27,4%	Não se aplica
<b>V-R-1-56d</b>	-37,0%	-30,3%	-58,1%	-29,2%
<b>V-40-1-56d</b>	Não se aplica	Não se aplica	-21,3%	Não se aplica
<b>V-20-2-56d</b>			Não se aplica	+18,3%
<b>V-40-2-56d</b>				Não se aplica

Fonte: Elaborado pelo autor.

De forma geral, para as idades de 28 e 56 dias, observou que todos os traços contendo agregado reciclado apresentaram uma menor retração autógena. Essa diferença foi máxima para o traço contendo 20% de agregado. Observou também que para valores de a/c superiores a 0,42, as diferenças entre a referência e as amostras com acréscimo de água foram ainda maiores.

Para as idades de 91 e 120 dias, foram observadas diferenças estatísticas entre os resultados nos mesmos traços. O resumo das diferenças percentuais nas retrações autógenas em relação à respectiva amostra de referência está detalhado na Tabela 55.

**Tabela 55:** Diferença da retração autógena para as argamassas produzidas com CPV-ARI e agregado reciclado, para as idades de 91 e 120 dias.

Amostra	V-20-1	V-40-1	V-20-2	V-40-2
<b>V-R-1-91d</b>	-32,3%	-26,8%	-37,3%	-12,5%
<b>V-R-1-120d</b>	-26,7%	-21,3%	-47,1%	-22,0%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como observado em idades anteriores, os traços contendo agregado reciclado apresentaram uma menor retração autógena, sendo que essa diferença foi maior para os traços com 20% de agregado reciclado, tanto com, quanto sem o acréscimo de água.

A diminuição da retração autógena para traços com a/c superiores a 0,42 já era esperado, uma vez que é relatado por Aitcin (2016), Liu *et al.* (2017) e Mao *et al.* (2021), que cimentos com elevada relação a/c desenvolvem uma retração autógena muito limitada. Outro fato bastante relatado na literatura é que à medida que o teor de agregado reciclado aumenta, há uma diminuição na retração autógena, possivelmente em virtude do efeito da cura interna. Esse fato foi relatado nos trabalhos de Gonzalez-Corominas e Etxeberria (2016), Medjigbodo *et al.* (2017), Wu *et al.* (2017), Li *et al.* (2020) e Nedeljković *et al.* (20121). Para esses pesquisadores, essa capacidade do agregado reciclado de promover cura interna está associada com sua maior capacidade de absorver água e depois liberá-la durante a autodissecção. Nesse trabalho, esse fenômeno foi observado nas amostras com cimento CPV-ARI. De fato, a rápida hidratação desse tipo de cimento pode levar a uma maior susceptibilidade de fissuração em teores baixos de a/c. Com a incorporação de agregado reciclado, a retração autógena é reduzida pelo controle de liberação de água para as reações de hidratação.

Entretanto, esse padrão é inversamente observado para amostras com CPIII-RS. Uma possível explicação para esse fato é que o agregado reciclado intensificou a taxa de hidratação desse cimento, promovendo uma maior formação dos produtos de hidratação. A reatividade mais lenta do cimento composto parece ter sido acelerada com a reserva de água presente nos agregados reciclados, devido à menor relação água/cimento efetiva disponível no sistema. Com isso, observou-se um aumento da retração autógena para esse tipo de cimento com agregados reciclados. Essa água armazenada no agregado poroso ainda apresenta potencial de ser liberada posteriormente, favorecendo a reação de hidratação mais prolongada.

## **5.7 Análise geral dos resultados**

A análise geral dos resultados foi realizada sob a óptica dos dois tipos de cimentos utilizados: CPIII-RS e CPV-ARI.

Para cimento CPIII-RS, a adição do agregado reciclado em teores de 20% (com e sem acréscimo de água) e 40% (sem acréscimo de água) não afetaram a porosidade

aberta (índice de vazios) das argamassas. Esse efeito foi refletido na resistência à compressão e à carbonatação. Referente à resistência à compressão, mesmo com adição de água nas amostras com 20% de RCD, não foi suficiente para reduzir a resistência a compressão da argamassa. O mesmo aconteceu para as amostras sem água adicional, ou seja, argamassas com mesma relação a/c não tiveram suas resistências afetadas, independentemente do teor de resíduo utilizado. Já relativo à carbonatação, para exposições prolongadas, constatou-se que a adição de água de fato promoveu uma redução nessa propriedade. Entretanto ressalta-se o bom desempenho das argamassas onde foi realizado apenas a substituição pelo agregado reciclado (e mesma relação a/c), que alcançaram resultados equivalentes à amostra de referência.

Também se observou, que apenas a substituição do agregado natural pelo reciclado, nos teores de 20% e 40%, não afetaram a absorção de água por capilaridade da argamassa. Esse fenômeno está em conformidade para os resultados obtidos na retração por secagem, onde as mesmas amostras, com 20% e 40%, apresentaram valores semelhantes aos de referência.

Ao se avaliar o período em que o pico de calor foi máximo durante a hidratação, identificou-se que a adição do agregado reciclado promoveu uma antecipação da sua ocorrência. Isso pode estar relacionado com a maior absorção de água do agregado reciclado. Essa retenção levou à diminuição de água disponível no sistema, reduzindo a relação água/cimento efetiva. A menor quantidade de água livre pode levar a uma menor capacidade de “arrefecimento” das reações exotérmicas, o que é observado pela antecipação da subida das curvas de calorimetria (período de aceleração das reações de hidratação). Além disso, a maior área superficial dos agregados reciclados contribuiu para a formação de pontos de nucleação para a hidratação do C-III-RS. Outro fator que pode explicar essa aceleração da hidratação é a maior alcalinidade presente nos agregados reciclados (em função de resquícios de pastas cimentícias aderidas a ele). Essa maior alcalinidade catalisa as reações de hidratação da escória de alto forno, geralmente mais lenta do que a hidratação do clínquer. Com isso, observa-se uma maior taxa de hidratação do cimento C-III-RS na presença de agregado reciclado. Como consequência, houve um aumento da retração autógena,

identificado principalmente para as amostras com acréscimo de água e maior quantidade de agregado, onde a antecipação do pico de calor também foi maior. Assim, a efetividade da cura interna do agregado reciclado se deu pela promoção de um meio mais reativo para hidratação do CPIII-RS.

Já para o cimento o cimento CPV-ARI, apenas a presença do agregado reciclado não promoveu alteração significativa da porosidade (índice de vazios) na argamassa. Entretanto, com o acréscimo de água na mistura, notou-se um ligeiro aumento, na ordem de 15%, dessa propriedade. Contudo, isso não foi suficiente para alteração da resistência à carbonatação nem da resistência à compressão da argamassa. Para esse tipo de cimento, os resultados entre as todas as amostras com resíduo e a referência foram equivalentes, independentemente da adição ou não de água para idades superiores a 28 dias. Isso significa que, a incorporação de até 40% de RCD, com ou sem água adicional, não provoca redução nas propriedades mecânicas nem de durabilidade de argamassas com CPV-ARI.

Assim como no índice de vazios, também não foi identificado alteração na absorção de água por capilaridade das argamassas em virtude da utilização dos agregados reciclados. Fato esse em convergência ao observado nos ensaios de retração por secagem, especialmente para idades superiores a 56 dias. Nesse ensaio as amostras com 20% RDC (com e sem acréscimo de água) e 40% RCD (sem acréscimo de água) apresentaram desempenho similar a referência.

Referente ao período em que o pico de calor foi máximo no ensaio de calorimetria, constatou-se que a adição do agregado reciclado promoveu uma ligeira antecipação da sua ocorrência. Esse fato foi o mesmo observado para o CPIII-RS (conforme justificado anteriormente), mas de maneira menos expressiva dado que para o cimento CPV-ARI a reação de hidratação já acontece de forma acelerada. Com isso, a água armazenada no agregado reciclado foi liberada de forma mais lenta, controlando a taxa de hidratação desse cimento que, pela sua característica de elevada finura e alto teor de clínquer, apresenta alta reatividade inicial. Esse fenômeno foi confirmado pela diminuição da retração autógena, observado em todas as amostras com agregado reciclado. A menor retração autógena leva a um menor efeito

de autodissecação, o que indica menor susceptibilidade de formação de fissuras pela rápida hidratação do cimento. Assim, a efetividade do agregado reciclado como agente de cura interna se deu pelo controle da hidratação do CPV-ARI.

Com isso, entende-se que o agregado reciclado é capaz de atuar de forma distinta nos mecanismos de hidratação de ambos os cimentos estudados. Assim, sua função como agente de cura interna parece propiciar um ambiente benéfico para melhorar as limitações e deficiências de cada tipo de compósito cimentício.

Dessa forma, identificou-se nesse trabalho que substituições de até 40% do agregado natural pelo reciclado (sem água adicional), apesar de levar a uma diminuição da consistência, não promoveu alteração prejudiciais em argamassas produzidas com cimento CPIII-RS. O que se evidenciou através dos ensaios é que até esse teor de substituição as argamassas com resíduo apresentaram resultados semelhantes a referência. Para o caso dos cimentos CPV-ARI os resultados encontrados foram semelhantes, sendo ainda possível corrigir a consistência para a amostra com substituição de 20% do agregado natural. Apesar de trazer um ligeiro aumento da porosidade, isso não gerou prejuízos a outras propriedades. Dessa forma a adoção de agregados reciclados, nos teores investigados, proporciona um ganho ambiental sem prejudicar nenhum dos aspectos técnicos avaliados.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram avaliados a influência dos agregados reciclados nas propriedades de argamassas produzidas com CPIII-RS e CPV-ARI, onde 20% e 40% do agregado natural, foi substituído, em volume, pelo agregado reciclado. Os agregados reciclados apresentaram menor densidade (12,0%) e maior teor de material pulverulento (196,1%) do que os agregados naturais. Ao que se refere a distribuição granulométrica, ambas as amostras se mostraram semelhantes.

No estado fresco, houve uma redução na consistência das amostras onde não se utilizou água adicional. Para o cimento CPIII-RS, a redução foi 17,1% e 20,0%, para as argamassas com 20% e 40% de agregado reciclado, respectivamente. Já para o cimento CPV-ARI, essa redução foi de 18,4% e 23,7%, para os mesmos traços. Relativo ao teor de ar incorporado e densidade no estado fresco, não foram observadas diferenças significativas entre as amostras em que não se fez uso de água adicional. A presença dos agregados reciclados também não promoveu alteração na quantidade de calor liberada durante a hidratação do cimento, porém, alterou o horário em que a maior variação térmica foi observada. A antecipação foi máxima para as amostras com 40% de agregado reciclado onde não se fez uso de água adicional. Para a amostra produzida com CPIII-RS, essa antecipação foi de 19,1% (equivalente a 3h:45min), enquanto a com CPV-ARI foi de 13,8% (equivalente a 1h:28min).

Quanto as propriedades físicas das argamassas, identificou que apenas as amostras com acréscimo de água apresentaram aumento significativo da capacidade de absorção por capilaridade e por imersão. Para os dois tipos de cimento estudado, as amostras que apresentaram maior aumento foram com 40% de agregado reciclado. Para a absorção por capilaridade, o aumento foi de 30,5% e 4,8%, para cimento CPIII-RS e CPV-ARI, respectivamente. Já para absorção por imersão o aumento foi de 10,4% e 17,3%, para os mesmos cimentos, respectivamente. O mesmo efeito foi observado no índice de vazios. Para essa propriedade, os aumentos foram de 8,9% e 10,4%, comparado com a referência, para os cimentos CPIII-RS e CPV-ARI, respectivamente.

Ao que se refere as propriedades mecânicas, todos os traços apresentaram comportamento estatisticamente equivalentes quanto à resistência à tração. Já a resistência à compressão, para as amostras produzidas com CPIII-RS, apenas o traço com 40% de agregado reciclado e acréscimo de água apresentou uma diminuição frente à referência (18,5% para idade de 91 dias). Já para as argamassas com CPV-ARI, a partir do 28º dia todas as amostras apresentaram comportamento semelhante. Dessa forma, mesmo com os agregados reciclados possuindo maior absorção e menor rigidez que os agregados naturais, estes não influenciaram negativamente no desempenho físico e mecânico. Esse fato foi atribuído ao efeito de cura interna proporcionado por esse material.

No quesito resistência à carbonatação, nas primeiras idades, verificou-se um aumento na frente carbonatada das argamassas CPIII-RS que se utilizou os agregados reciclados. Entretanto, com a exposição prolongada do compósito à atmosfera concentrada em CO<sub>2</sub>, a diferença entre a referência e as amostras com agregado reciclado sem acréscimo de água deixou de existir. Já para as amostras contendo CPV-ARI, mesmo com 91 dias de exposição ao CO<sub>2</sub> não foi observado alterações da resistência da argamassa frente à carbonatação.

No ensaio de retração por secagem, também não foi notado diferenças significativas entre as amostras com agregado reciclado e as de referências, salvo aquelas onde se fez a necessidade de água adicional, onde houve aumento dessa propriedade. Já referente à retração autógena, para os traços produzidos com CPIII-RS, identificou-se que a amostra com 40% de substituição do agregado natural, sem água adicional, apresentou um aumento da 27,8% dessa propriedade devido à facilitação da hidratação desse cimento composto. Entretanto, para o cimento CPV-ARI foi observado uma redução na retração autógena na presença dos agregados reciclados. Isso devido à um retardo na taxa de hidratação, levando à diminuição dos efeitos da autodissecação. Essa diminuição foi máxima para o traço com 40% de agregado reciclado, chegando a 17.5%. Assim, o uso do agregado reciclado resultou em diferentes mecanismos de cura interna para os cimentos estudados.

Portanto, o uso de agregado miúdo reciclado se mostra eficiente na promoção da cura interna de compósitos cimentícios. Ele é capaz de manter as propriedades mecânicas e de durabilidade similares a materiais convencionais, além de contribuir para um setor ambientalmente sustentável na utilização de resíduos em argamassas ecoeficientes.

### **Sugestão para trabalhos futuros**

A seguir, são apresentadas sugestões para continuidade do trabalho, no intuito de avaliar a influência do agregado reciclado nas matrizes cimentícias.

- Estudo outros parâmetros durabilidade de argamassas, utilizando a mesma dosagem desta pesquisa, como ataques de cloreto e resistividade elétrica;
- Avaliar métodos alternativos para contornar a perda de consistência em função da adição dos agregados reciclados, que não a utilização de água adicional, como por exemplo, outros teores de aditivos plastificantes;
- Avaliar a microestrutura das argamassas produzidas com agregado reciclado;
- Extrapolar o estudo atual para concretos, realizando a substituição parcial tanto da fração miúda quanto graúda;
- Avaliar outros tipos de agregado reciclado, como os oriundos puramente de tijolos cerâmicos ou de concretos.
- Avaliar o efeito da pré-molhagem dos agregados reciclados nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos compósitos cimentícios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON. Mercado. [São Paulo, 2022b] Disponível em: <<https://abrecon.org.br/reciclagem-de-entulho-residuos-da-construcao-e-demolicaorcd/mercado/>>. Acesso em 15 Jun. 2022

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2021**. São Paulo. [s.n.], 2022. Disponível em: < <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>

ADAMS, M. P.; FU, T.; CABRERA, A. G.; MORALES, M.; IDEKER, J. H.; ISGOR, O. B. Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 802–810, 15 jan. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.022>

AGHABAGLOU, A. M.; YÜKSEL, C.; BEGLARIGALE, A.; RAMYAR, K. Improving the mechanical and durability performance of recycled concrete aggregate-bearing mortar mixtures by using binary and ternary cementitious systems. **Construction and Building Materials**, v.196, p.295-306, 22 nov 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.124>

AGOSTINHO, L. B.; BORGES, J. G.; SILVA, E. F.; CUPERTINO, D. V. M. R. Análise calorimétrica de pastas de cimento Portland contendo polímero superabsorvente (SAP) e nanopartículas de sílica (NS). **Revista Matéria**, v. 25, n.4., 27 mai. 2020

Aïtcin, P. C. Curing compounds. In: Aïtcin, P. C.; Robert Flatt, R. **Science and Technology of Concrete Admixtures**. Woodhead Publishing, 2015, p. 483-487.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K.; Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 8 mar 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>

ALMEIDA, F. C. R. **New generation of high performance cementitious materials: application of SAP in PC-GGBS matrices**. 2018. Tese (Doutorado em Engineering and Built Environment.) - Glasgow Caledonian University, GCU, Escócia, 2018.

ANEPAC. Mercado de agregados – Perspectivas para 2022. Disponível em: <<https://www.anepac.org.br/relacionamento/noticias/item/491-mercado-de-agregados-perspectivas-para-2022#:~:text=Em%202021%20o%20mercado%20de,anos%20de%202013%20e%202017>> Acesso em 23 de maio. 2022

ASLANI, F.; MA, G.; WAN, D. L. Y.; MUSELIN, G. Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 553–566, 1 mai 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 10342**: Concreto - Perda de abatimento – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 12006**: Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção - Novos Materiais para a Construção Civil**. 5°. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

BESSA, S. A. L., MELLO, T. A. G., LOURENÇO, K. K. Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição gerados em Belo Horizonte/MG. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 11. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20180099>

BRAVO, M.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J. Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition. **Construction and Building Materials**, v. 168, p. 818–830, 20 abr. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.176>

BRITO, J. et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1–16, 1 jun. 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.003>

Câmara Brasileira da indústria da construção – CBIC. **PIB da construção fecha o ano com crescimento de 9,7%, a maior alta em 11 anos**. 2022. Disponível em: <[https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-](https://cbic.org.br/pib-da-construcao-fecha-o-ano-com-crescimento-de-97-a-maior-alta-em-11-anos/#:~:text=O%20Produto%20Interno%20Bruto%20(PIB,sexta%20feira%20(4).>)

anos/#:~:text=O%20Produto%20Interno%20Bruto%20(PIB,sexta%20feira%20(4).> Acessado em 28 de abril de 2022.

CARTUXO, F.; BRITO, J.; EVANGELISTAM L.; JIMENEZ, J. R.; LEDESMA, E. F. Rheological behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizer. **Construction and Build Materials**, v. 89, p. 36-47, 1 ago; 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.119>

CHEN, W.; JIN, R.; XU, Y.; WANATOWSKI, D.; LI, B.; YAN, L.; PAN, Z.; YANG, Y. Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature. **Construction and Building Materials**, v. 218, p. 483-496, 28 mai. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.130>

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução Nº 307** de 5 de julho de 2002.

EL-HAWARY, M.; AL-SULILY, A. Internal curing of recycled aggregates concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 275, 20 jul 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122911>

FUSCO P. B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2008.

GOMES, P. C. C.; ULSEN, C.; PEREIRA, F. A.; QUATTRONE, M.; ÂNGULO, S. C. Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled Aggregates. **Waste Management**, v.45, p. 171-180, 11 jul. 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.008>

GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M. Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 32–41, 15 jul. 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.031>

GUO, H.; SHI, C.; GUAN, X.; ZHU, J.; DING, Y.; LING, T. C.; ZHANG, H.; WANG, Y. Durability of recycled aggregate concrete – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 251-259, 18 mai. 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>

HAWARY, E. H.;SULILY, A. A.; Internal curing of recycled aggregates concrete. **Journal of Cleaner Production**, v.275, 20 jul. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122911>

HE, Z.; HU, H.; CASANOVA, I.; LIANG, C.; DU, S.; Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 254, 28 abr 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119312>

Hemkemeier, T.A. **Compósitos cimentícios ecoeficientes com areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar modificados com polímeros superabsorventes**. Qualificação (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2023.

HU, J.; GE, Z.; WANG, K. Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early heat of hydration and set times. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 657-663, 15 jan. 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.011>

JAWED, I; SKALNY, J; YOUNG, J. F; **Hydrataion of Portland cement**. In: **BARNES, P. (Ed.). Structure and Performace of Cement**. Ssex: Apllçoed Science Plublishers, 1983, p 237-318.

JEONG, J.; RAMEZANI, H.; LEKLOU, N. Why does the modified Arrhenius' law fail to describe the hydration modeling of recycled aggregate? **Thermochimica Acta**, v. 626, p. 13-30, 20 fev. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.01.001>

JESUS, S.; MAIA, C.; FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R. Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116844-116853, 9 set. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116844>

KISKU, N. et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 721–740, 30 jan. 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>

KOENDERS, E. A. B.; PEPE, P. MARTINELLI, E. Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 46, p. 203-212, fev, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.012>

KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete Properties. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 554–572, 10 out. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.128>

LI, Z.; LIU, J.; XIAO, J.; ZHONG, P. Internal curing effect of saturated recycled fine aggregates in early-age mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 108. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103444>

LIU, J.; SHI, C.; MA, X.; KHAYAT, K. H.; ZHANG, J.; WANG, D. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 702-712, 25 abr. 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.154>

LOTTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D.; Supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p.1244-1256, 01 dez. 2011.  
DOI: [10.1016/j.cemconres.2010.12.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001)

MAO, Y.; LIU, J.; SHI, C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 295, 1 maio 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126435>

MEDJIGBODO, S.; BENDIMERAD, A. Z.; ROZI, E.; LOUKILI, A. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 72–86, 1 fev. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.003>

NELFIA, L. O.; MAHIEUX, P. Y.; AMIRI, O.; TURCRY, P.; LUX, J. Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials. **Materials and Structures**, v. 49, p. 3229-3251, 17 out. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0716-1>

NEDELJKOVIĆ, M. VISSER, J.; SAVIJA, B.; VALCKE, S.; SCHLANGEN, E. Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. **Journal of Building Engineering**, v. 38, 1 jun. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102196>

MELO NETO, A. A.; CINCOTTO, M. A.; REPETTE, W. Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 4, p. 565–574, 1 nov. 2008.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.

PACHECO, J. et al. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 110–120, 20 mar. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 164, p. 939–949, 15 out. 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.249>

PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability

and long-term properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 294–309, 15 nov. 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.215>

PEPE, M.; KOENDERS, E. A. B.; FAELLA, C.; MARTINELLI, E. Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models. **Mechanics Research Communications**, v. 58, p. 139-145, 12 de fev. 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2014.02.001>

PICKEL, D.; TIGHE, S.; West, J. S. Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete. **Construction and Building Materials**, v. 14, p. 245-252, 9 mar 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.140>

RIBEIRO, D. V.; SANTOS, B. S. ; DIAS, C. M. R. ; JUNGBLUT, M. E. ; CASCUDO, O. ; CAPUZZO, V. M. S. . Procedimentos de ensaio de carbonatação acelerada (corpos de prova) e natural (testemunhos) do concreto - Práticas Recomendadas IBRACON. 1. ed. São Paulo: Arte Interativa, 2021. v. 1. 41p .

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2-26, 28 jul. 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>

SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 466-472. 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>

SICAKOVA, A.; JUNAK, J. Concrete containing recycled concrete aggregate with modified surface. **Procedia Engineering**, v.180, p. 1284-1291. 2018.

SILVA, S.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 272, p. 19-31, 22 fev. 2021.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121645>

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 178, 30 de jul. 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>

SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K. Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, v.105, p. 400-415. 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.171>

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124. 09 de jul. 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105799>

SOUCHEA, J. C.; BENDIMERAD, A. Z.; ROZIERE, E.; SALGUES, M.; DEVILLERS, P.; DIAZ, E. G.; LOUKILI, A. Early age behaviour of recycled concrete aggregates under normal and severe drying conditions. **Journal of Building Engineering**, v. 13, p. 244-253, 31 ago. 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.08.007>

TAHAR, Z.; NGA, T. T.; KADRI, E. H.; BOUVET, A.; DEBIED, F.; AGGOUN, S. Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v.149, p. 91-102, 19 mai. 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.152>

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v.172, p. 272-292, 30 mai. 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>

THOMAS, C.; BRITO, J.; CIMENTADA, A.; SAINZ-AJA, J. A. Macro- and micro-properties of multi-recycled aggregate concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 245. 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118843>

VIEIRA, T.; ALVES, A.; BRITO, J.; CORREIA, J. R.; SILVA, R. V. Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware. **Materials and Design**, v. 90, p. 767-776. 2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.023>

VINAY, K. B. M.; ANANTHAN, H.; BALAJI, K. V. A. Experimental studies on utilization of recycled coarse and fine aggregates in high performance concrete mixes. **Alexandria Engineering Journal**, v. 57, n. 3, p. 1749–1759, 1 set. 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.05.003>

WU, L.; FARZADNIA, N.; SHI, C.; ZHANG, Z.; WANG, H. Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 62-75, 19 de mai. 2017.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.064>

YILDIRIM, S. T.; MEYER, C.; HERFELLNER, S. Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 91, p. 288–296, 28 mai. 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.045>

ZHANG, C.; HU, M.; MAIO, F. D.; SPRECHER, B.; YANG, X.; TUKKER, A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. **Science of the Total Environment**, v. 803, 1 de set. 2021.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>

ZHANG, L. W.; SOJOBI, A. O.; KODUR, V. K. R.; LIEW, K. M. Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment. **Journal of Cleaner Production**, v. 236, 11 jul. 2019  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.075>

## APÊNDICE A

**Tabela A1:** Tabela resumo com os artigos utilizados no trabalho.

Autores	Título	Citações	Tipo de agregado	Foco do artigo
ADAMS, M. P.; FU, T.; CABRERA, A. G.; MORALES, M.; IDEKER, J. H.; ISGOR, O. B.	Cracking susceptibility of concrete made with coarse recycled concrete aggregates	73	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda
AGHABAGLOU, A. M.; YÜKSEL, C.; BEGLARIGALE, A.; RAMYAR, K	Improving the mechanical and durability performance of recycled concrete aggregate-bearing mortar mixtures by using binary and ternary cementitious systems	47	Agregado reciclado de concreto	Fração miúda
AKHTAR, A.; SARMAH, A. K.	Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective	826	-	Revisão
ASLANI, F.; MA, G.; WAN, D. L. Y.; MUSELIN, G.	Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules	313	Agregado reciclado de Concreto	Fração miúda
BESSA, S. A. L., MELLO, T. A. G., LOURENÇO, K. K.	Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição gerados em Belo Horizonte/MG	16	-	Revisão
BRAVO, M.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; PACHECO, J.	Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition	103	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda e miúda
BRITO, J. et al.	Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete	235	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda

Continua.

Autores	Título	Citações	Tipo de agregado	Foco do artigo
CARTUXO, F.; BRITO, J.; EVANGELISTAM L.; JIMENEZ, J. R.; LEDESMA, E. F.	Rheological behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates - Influence of the superplasticizer	198	Agregado reciclado de Concreto	Fração miúda
CHEN, W.; JIN, R.; XU, Y.; WANATOWSKI, D.; LI, B.; YAN, L.; PAN, Z.; YANG, Y.	Adopting recycled aggregates as sustainable construction materials: A review of the scientific literature	135	-	Revisão
EL-HAWARY, M.; AL-SULILY, A.	Internal curing of recycled aggregates concrete	55	Não informa	Fração graúda e miúda
GOMES, P. C. C.; ULSEN, C.; PEREIRA, F. A.; QUATTRONE, M.; ÂNGULO, S. C.	Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled Aggregates	49	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda
GONZALEZ-COROMINAS, A.; ETXEBERRIA, M.	Effects of using recycled concrete aggregates on the shrinkage of high performance concrete	168	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda
GUO, H.; SHI, C.; GUAN, X.; ZHU, J.; DING, Y.; LING, T. C.; ZHANG, H.; WANG, Y.	Durability of recycled aggregate concrete – A review	601	-	Revisão
HE, Z.; HU, H.; CASANOVA, I.; LIANG, C.; DU, S.;	Effect of shrinkage reducing admixture on creep of recycled aggregate concrete	37	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda e miúda
HU, J.; GE, Z.; WANG, K.	Influence of cement fineness and water-to-cement ratio on mortar early heat of hydration and set times	282	-	Revisão
JESUS, S.; MAIA, C.; FARINHA, C. B.; BRITO, J.; VEIGA, R.	Rendering mortars with incorporation of very fine aggregates from construction and demolition waste	72	Agregado reciclado misto	Fração miúda
KISKU, N. et al.	A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material	545	-	Revisão
KOENDERS, E. A. B.; PEPE, P. MARTINELLI, E.	Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates	137	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda
KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. D.	Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete Properties	127	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda
LI, Z.; LIU, J.; XIAO, J.; ZHONG, P.	Internal curing effect of saturated recycled fine aggregates in early-age mortar	55	Agregado reciclado de Concreto	Fração miúda

Continua.

Autores	Título	Citações	Tipo de agregado	Foco do artigo
LIU, J.; SHI, C.; MA, X.; KHAYAT, K. H.; ZHANG, J.; WANG, D.	An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials	213	-	Revisão
LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D.;	Supplementary cementitious materials	912	-	Revisão
MAO, Y.; LIU, J.; SHI, C.	Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: A review	89	-	Revisão
MEDJIGBODO, S.; BENDIMERAD, A. Z.; ROZI, E.; LOUKILI, A.	How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties?	87	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda e miúda
NELFIA, L. O.; MAHIEUX, P. Y.; AMIRI, O.; TURCRY, P.; LUX, J.	Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials	107	Agregado reciclado de Concreto	Fração miúda
NEDELJKOVIĆ, M. VISSER, J.; SAVIJA, B.; VALCKE, S.; SCHLANGEN, E.	Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review	244	-	Revisão
PACHECO, J. et al.	Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates	206	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda
PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.	Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry	112	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda
PEDRO, D.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.	Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties	272	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda e miúda
PEPE, M.; KOENDERS, E. A. B.; FAELLA, C.; MARTINELLI, E.	Structural concrete made with recycled aggregates: Hydration process and compressive strength models	33	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda
PICKEL, D.; TIGHE, S.; West, J. S.	Assessing benefits of pre-soaked recycled concrete aggregate on variably cured concrete	38	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda
SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M.	Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry	946	-	Revisão

Continua.

Autores	Título	Citações	Tipo de agregado	Foco do artigo
SHI, C.; LI, Y.; ZHANG, J.; LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z.	Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review	877	-	Revisão
SICAKOVA, A.; JUNAK, J.	Concrete containing recycled concrete aggregate with modified surface	51	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda
SILVA, S.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J.	Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates	87	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda
SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K.	Fresh-state performance of recycled aggregate concrete: A review	187	-	Revisão
SILVA, R. V.; BRITO, J.; DHIR, R. K.	Performance of cementitious renderings and masonry mortars containing recycled aggregates from construction and demolition wastes	166	Agregado reciclado de Concreto	Fração miúda
SOUCHEA, J. C.; BENDIMERAD, A. Z.; ROZIERE, E.; SALGUES, M.; DEVILLERS, P.; DIAZ, E. G.; LOUKILI, A.	Early age behaviour of recycled concrete aggregates under normal and severe drying conditions	48	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda
TAHAR, Z.; NGA, T. T.; KADRI, E. H.; BOUVET, A.; DEBIED, F.; AGGOUN, S.	Effect of cement and admixture on the utilization of recycled aggregates in concrete	83	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda e miúda
TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J.	A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017)	901	-	Revisão
THOMAS, C.; BRITO, J.; CIMENTADA, A.; SAINZ-AJA, J. A.	Macro- and micro- properties of multi-recycled aggregate concrete	157	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda e miúda
VIEIRA, T.; ALVES, A.; BRITO, J.; CORREIA, J. R.; SILVA, R. V.	Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware	163	Agregado reciclado tijolo/louças	Fração miúda
VINAY, K. B. M.; ANANTHAN, H.; BALAJI, K. V. A.	Experimental studies on utilization of recycled coarse and fine aggregates in high performance concrete mixes	49	Agregado reciclado de concreto	Fração graúda e miúda
WU, L.; Farzadnia, N.; SHI, C.; ZHANG, Z.; WANG, H.	Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review	346	-	Revisão

Continua.

Autores	Título	Citações	Tipo de agregado	Foco do artigo
YILDIRIM, S. T.; MEYER, C.; HERFELLNER, S.	Effects of internal curing on the strength, drying shrinkage and freeze-thaw resistance of concrete containing recycled concrete aggregates	224	Agregado reciclado de Concreto	Fração miúda
ZHANG, C.; HU, M.; MAIO, F. D.; SPRECHER, B.; YANG, X.; TUKKER, A.	An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe.	269	-	Revisão
ZHANG, L. W.; SOJOBI, A. O.; KODUR, V. K. R.; LIEW, K. M.	Effective utilization and recycling of mixed recycled aggregates for a greener environment	160	Agregado reciclado de Concreto	Fração graúda e miúda

## APÊNDICE B

**Tabela B1:** Dados do ensaio de absorção por imersão das amostras produzidas com CPIII-RS.

Amostra	Idade (dias)	Massa inicial (g)	Massa pós estufa (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)
III-R-1	28	468,73	457,69	266,88	487,42
III-R-2	28	469,36	457,75	266,69	486,01
III-R-3	28	457,79	446,27	259,45	474,24
III-20-1-1	28	472,79	461,05	267,86	489,76
III-20-1-2	28	457,00	445,38	257,98	473,77
III-20-1-3	28	466,28	453,80	262,35	481,63
III-40-1-1	28	461,24	449,77	259,44	477,40
III-40-1-2	28	464,04	452,95	261,71	482,19
III-40-1-3	28	461,13	449,80	259,41	477,00
III-20-2-1	28	465,25	453,16	264,02	484,11
III-20-2-2	28	471,59	459,52	267,38	490,52
III-20-2-3	28	464,66	452,73	267,78	483,45
III-40-2-1	28	441,80	430,81	250,30	461,32
III-40-2-2	28	460,50	449,24	259,96	480,17
III-40-2-3	28	456,13	444,76	257,78	475,11
III-R-1	91	457,94	446,90	264,40	486,42
III-R-2	91	472,82	461,21	275,38	500,50
III-R-3	91	460,89	449,37	268,47	488,25
III-20-1-1	91	457,89	446,15	266,91	486,77
III-20-1-2	91	466,03	454,41	271,63	494,78
III-20-1-3	91	464,86	452,38	269,60	492,53
III-40-1-1	91	452,67	441,20	262,85	480,93
III-40-1-2	91	443,25	432,16	255,75	476,75
III-40-1-3	91	449,50	438,17	260,65	478,44
III-20-2-1	91	458,09	446,00	266,36	486,81
III-20-2-2	91	457,30	445,23	266,15	485,74
III-20-2-3	91	457,69	445,76	266,46	486,25
III-40-2-1	91	439,93	428,94	256,19	470,21
III-40-2-2	91	448,32	437,06	260,77	478,80
III-40-2-3	91	448,74	437,37	261,57	479,17

**Tabela B2:** Dados do ensaio de absorção por imersão das amostras produzidas com CPV-ARI.

Amostra	Idade (dias)	Massa inicial (g)	Massa pós estufa (g)	Massa imersa (g)	Massa saturada (g)
V-R-1	28	480,15	468,42	273,31	492,76
V-R-2	28	480,49	469,09	272,55	491,25
V-R-3	28	473,02	461,64	268,24	484,10
V-20-1-1	28	475,21	463,92	267,64	487,14
V-20-1-2	28	474,25	463,06	268,05	486,55
V-20-1-3	28	477,37	466,52	269,15	489,22
V-40-1-1	28	477,86	466,57	269,80	489,72
V-40-1-2	28	482,52	471,22	272,76	495,85
V-40-1-3	28	481,06	470,08	271,40	492,78
V-20-2-1	28	475,95	463,99	269,34	489,83
V-20-2-2	28	481,01	469,07	271,28	494,34
V-20-2-3	28	474,26	462,33	267,82	488,04
V-40-2-1	28	467,09	455,37	263,19	481,38
V-40-2-2	28	489,50	477,47	275,64	504,39
V-40-2-3	28	469,52	457,28	264,64	484,03
V-R-1	91	492,56	481,05	281,17	507,00
V-R-2	91	477,21	466,30	272,29	490,67
V-R-3	91	475,89	464,62	272,63	490,72
V-20-1-1	91	472,20	460,70	267,87	487,76
V-20-1-2	91	470,89	459,48	267,56	486,10
V-20-1-3	91	475,32	463,92	270,16	491,00
V-40-1-1	91	472,11	461,44	266,18	485,75
V-40-1-2	91	482,14	471,06	273,37	496,73
V-40-1-3	91	474,61	463,57	269,47	489,70
V-20-2-1	91	466,84	454,90	265,55	483,16
V-20-2-2	91	472,87	461,12	269,11	489,22
V-20-2-3	91	475,16	463,32	270,05	492,23
V-40-2-1	91	465,38	451,17	262,73	480,29
V-40-2-2	91	473,12	461,27	268,16	489,84
V-40-2-3	91	476,30	464,44	270,57	494,19

**Tabela B3:** Tabela resumo da absorção por imersão das argamassas.

Amostra	Idade	Absorção	Desvio	CV
III-R	28	6,31%	0,14%	2,14%
III-20-1		6,24%	0,10%	1,59%
III-40-1		6,22%	0,17%	2,80%
III-20-2		6,79%	0,03%	0,50%
III-40-2		6,93%	0,11%	1,59%
III-R	91	8,67%	0,13%	1,53%
III-20-1		8,95%	0,11%	1,18%
III-40-1		9,50%	0,58%	6,10%
III-20-2		9,11%	0,03%	0,31%
III-40-2		9,58%	0,03%	0,33%
V-R	28	4,93%	0,20%	4,01%
V-20-1		4,98%	0,09%	1,73%
V-40-1		5,01%	0,17%	3,30%
V-20-2		5,51%	0,08%	1,52%
V-40-2		5,73%	0,09%	1,53%
V-R	91	5,41%	0,16%	2,96%
V-20-1		5,83%	0,03%	0,56%
V-40-1		5,45%	0,15%	2,76%
V-20-2		6,18%	0,06%	1,02%
V-40-2		6,35%	0,11%	1,78%

**Tabela B4:** Dados do ensaio de absorção por capilaridade das amostras produzidas com CPIII-RS.

Amostra	Idade (dias)	Massa inicial (g)	Massa pós estufa (g)	Massa após contato do corpo de prova com a água					Ø (cm)	h CP (cm)	h (cm)
				t = 3h	t = 6h	t = 24h	t = 48h	t = 72h			
III-R-1	28	459,42	448,11	464,24	465,00	467,36	467,58	467,84	5,20	10,00	2,80
III-R-2	28	450,23	438,42	455,21	455,99	458,50	458,79	459,14	5,30	10,10	2,80
III-R-3	28	454,70	443,31	459,33	459,92	462,18	462,57	463,03	5,30	10,20	2,70
III-20-1-1	28	454,29	442,47	460,43	461,23	463,58	463,84	464,09	5,20	9,80	3,00
III-20-1-2	28	450,75	439,10	455,73	456,44	458,82	459,11	459,40	5,30	9,80	2,70
III-20-1-3	28	448,14	436,55	425,38	453,06	455,17	455,51	455,84	5,30	10,10	2,50
III-40-1-1	28	446,61	435,41	452,63	453,29	455,62	455,81	456,01	5,20	10,10	2,80
III-40-1-2	28	450,73	438,98	457,18	457,90	460,42	460,67	460,92	5,20	10,20	2,90
III-40-1-3	28	453,69	442,11	459,75	460,44	462,84	463,11	463,39	5,20	9,90	3,10
III-20-2-1	28	450,98	438,28	458,75	459,90	463,28	463,74	463,93	5,30	10,10	3,10
III-20-2-2	28	445,65	433,10	452,74	456,47	458,35	458,58	458,68	5,20	10,00	3,30
III-20-2-3	28	450,75	438,94	456,20	457,23	460,07	460,55	460,76	5,40	10,00	3,20
III-40-2-1	28	448,87	437,22	456,85	457,97	461,19	461,60	461,76	5,20	10,10	3,50
III-40-2-2	28	443,07	431,18	449,16	449,92	452,86	453,57	453,84	5,30	10,10	3,20
III-40-2-3	28	441,64	429,47	448,90	449,94	452,87	453,55	453,81	5,30	10,10	3,20
III-R-1	91	452,83	441,52	448,87	450,50	454,39	455,20	455,65	5,10	9,80	3,60
III-R-2	91	462,91	451,10	459,02	460,67	464,06	465,19	465,58	5,20	10,20	3,40
III-R-3	91	456,32	444,93	452,88	454,47	457,45	458,37	458,89	5,20	9,80	3,20
III-20-1-1	91	456,95	445,13	452,86	454,83	458,87	459,67	460,24	5,20	9,90	3,70
III-20-1-2	91	461,15	449,50	458,30	460,26	464,06	465,24	465,78	5,30	10,00	3,80
III-20-1-3	91	458,92	447,33	455,96	457,71	460,76	462,36	462,75	5,30	9,90	3,50
III-40-1-1	91	448,38	437,18	445,01	446,81	450,67	451,41	451,88	5,10	10,00	3,40
III-40-1-2	91	452,04	440,29	449,13	450,97	454,09	455,26	455,70	5,10	10,20	3,40
III-40-1-3	91	452,18	440,60	449,12	450,65	453,31	454,65	455,21	5,30	9,90	3,30
III-20-2-1	91	455,30	442,60	451,21	453,37	458,21	459,06	459,71	5,20	10,00	4,10
III-20-2-2	91	453,92	441,37	450,99	453,11	457,26	458,44	459,08	5,20	9,80	4,10
III-20-2-3	91	443,23	431,42	441,43	443,19	446,79	448,65	449,46	5,10	9,90	3,90
III-40-2-1	91	447,16	435,51	445,35	447,53	452,20	453,09	453,78	5,10	10,20	3,70
III-40-2-2	91	438,21	426,32	436,27	438,26	442,39	443,48	444,20	5,10	9,90	3,90
III-40-2-3	91	470,73	458,56	469,33	471,12	474,72	476,61	477,36	5,10	9,80	3,90

**Tabela B5:** Dados do ensaio de absorção por imersão capilaridade das amostras produzidas com CPV-ARI.

Amostra	Idade (dias)	Massa inicial (g)	Massa pós estufa (g)	Massa após contato do corpo de prova com a água					Ø (cm)	h CP (cm)	h (cm)
				t = 3h	t = 6h	t = 24h	t = 48h	t = 72h			
V-R-1	28	479,56	468,34	472,17	473,09	474,78	475,70	476,01	5,20	10,00	2,30
V-R-2	28	474,95	463,75	467,89	468,88	470,67	471,46	471,81	5,30	10,10	2,40
V-R-3	28	483,03	471,70	476,20	477,23	478,98	479,83	480,21	5,30	9,90	2,30
V-20-1-1	28	481,67	470,05	474,13	474,99	476,74	477,48	477,69	5,40	9,80	3,20
V-20-1-2	28	496,60	484,86	488,88	489,61	491,15	491,75	492,09	5,20	9,90	3,30
V-20-1-3	28	489,31	477,09	481,63	482,45	484,04	484,99	485,41	5,20	10,20	2,70
V-40-1-1	28	478,38	466,52	470,54	471,45	473,50	474,26	474,85	5,30	9,80	2,40
V-40-1-2	28	471,74	460,15	464,49	465,49	467,25	468,19	468,50	5,10	9,90	2,70
V-40-1-3	28	475,62	464,10	468,60	469,60	471,02	471,86	472,21	5,20	9,80	2,50
V-20-2-1	28	473,42	460,98	466,13	467,37	469,40	470,21	470,78	5,30	10,10	2,60
V-20-2-2	28	465,99	453,62	459,23	460,26	462,37	463,43	463,88	5,30	10,30	2,50
V-20-2-3	28	478,11	465,72	471,31	472,31	473,93	474,94	475,39	5,30	10,10	2,30
V-40-2-1	28	473,23	460,82	465,50	466,43	468,01	468,86	469,20	5,30	10,10	2,50
V-40-2-2	28	465,97	453,56	458,83	459,73	461,26	462,21	462,56	5,30	10,20	2,40
V-40-2-3	28	466,32	453,89	459,96	460,78	462,16	463,01	463,44	5,30	10,10	2,40
V-R-1	91	470,37	459,30	462,27	463,18	464,90	465,47	465,90	5,20	9,90	2,40
V-R-2	91	480,64	469,28	474,43	475,35	477,11	477,74	478,10	5,30	10,10	2,50
V-R-3	91	476,57	465,36	469,10	470,02	471,63	472,25	472,67	5,20	9,80	2,40
V-20-1-1	91	474,55	463,39	467,13	467,87	469,60	470,14	470,49	5,20	10,10	2,30
V-20-1-2	91	478,38	467,69	470,47	471,21	472,85	473,49	473,84	5,10	10,10	2,00
V-20-1-3	91	474,28	463,17	467,30	468,04	469,62	470,29	470,60	5,10	10,00	2,10
V-40-1-1	91	473,00	461,84	466,05	466,97	468,65	469,27	469,67	5,30	10,10	2,00
V-40-1-2	91	473,20	462,03	467,70	468,62	468,85	469,25	469,67	5,10	10,00	2,00
V-40-1-3	91	478,01	466,79	470,58	471,50	473,03	473,66	474,11	5,10	10,00	2,00
V-20-2-1	91	469,43	457,76	462,57	463,59	465,68	466,19	466,73	5,30	10,10	2,40
V-20-2-2	91	471,81	460,25	464,69	465,72	467,47	468,04	468,53	5,10	9,80	2,30
V-20-2-3	91	479,08	467,34	473,34	474,39	476,11	476,56	477,09	5,20	9,80	2,30
V-40-2-1	91	470,27	459,08	463,66	464,50	465,93	466,49	466,80	5,10	10,20	2,20
V-40-2-2	91	471,32	460,13	465,47	466,31	467,55	468,15	468,47	5,20	10,20	2,30
V-40-2-3	91	465,28	454,09	459,12	459,95	461,11	461,64	462,06	5,20	10,10	2,20

**Tabela B6:** Tabela resumo da absorção por capilaridade das argamassas.

Idade	t = 3h			t = 6h			t = 24h			t = 48h			t = 72h		
	Absorção	Desvio	CV												
28	0,079	0,005	6,42%	0,098	0,006	6,01%	0,131	0,006	4,71%	0,147	0,006	3,97%	0,153	0,006	4,12%
	0,080	0,004	4,73%	0,096	0,004	4,09%	0,127	0,004	2,86%	0,141	0,006	4,38%	0,147	0,007	4,76%
	0,084	0,005	5,59%	0,103	0,006	5,53%	0,137	0,003	1,95%	0,154	0,004	2,78%	0,162	0,003	1,67%
	0,101	0,004	3,51%	0,121	0,002	1,27%	0,157	0,003	1,80%	0,175	0,003	1,99%	0,184	0,003	1,65%
	0,099	0,011	10,75%	0,116	0,010	8,49%	0,144	0,008	5,77%	0,160	0,008	5,14%	0,167	0,009	5,35%
91	0,076	0,016	20,77%	0,093	0,016	16,69%	0,126	0,015	12,26%	0,138	0,016	11,39%	0,145	0,015	10,31%
	0,069	0,011	16,23%	0,083	0,011	13,49%	0,115	0,011	9,55%	0,127	0,011	8,73%	0,133	0,011	8,10%
	0,088	0,017	18,74%	0,106	0,017	15,71%	0,128	0,005	3,65%	0,138	0,003	2,04%	0,147	0,003	1,75%
	0,099	0,013	13,56%	0,119	0,014	11,57%	0,155	0,012	7,94%	0,165	0,011	6,95%	0,175	0,012	6,68%
	0,095	0,005	5,48%	0,111	0,005	4,57%	0,135	0,003	2,59%	0,146	0,004	2,65%	0,152	0,004	2,39%
28	0,307	0,007	2,44%	0,320	0,009	2,87%	0,365	0,011	3,10%	0,370	0,010	2,79%	0,377	0,009	2,45%
	0,329	0,017	5,15%	0,337	0,024	7,26%	0,381	0,027	7,13%	0,386	0,027	6,89%	0,392	0,026	6,66%
	0,338	0,007	2,10%	0,351	0,008	2,14%	0,397	0,009	2,22%	0,402	0,009	2,34%	0,406	0,010	2,47%
	0,360	0,029	7,93%	0,397	0,045	11,44%	0,448	0,041	9,10%	0,455	0,039	8,64%	0,458	0,039	8,46%
	0,358	0,016	4,46%	0,376	0,019	5,04%	0,433	0,021	4,90%	0,444	0,019	4,33%	0,448	0,018	4,12%
91	0,151	0,004	2,52%	0,182	0,003	1,86%	0,249	0,006	2,37%	0,268	0,004	1,61%	0,277	0,004	1,58%
	0,160	0,007	4,46%	0,196	0,006	3,08%	0,266	0,008	2,89%	0,289	0,006	2,12%	0,298	0,006	2,13%
	0,162	0,007	4,14%	0,195	0,007	3,70%	0,257	0,011	4,15%	0,278	0,008	2,94%	0,288	0,007	2,53%
	0,184	0,014	7,45%	0,224	0,012	5,22%	0,305	0,005	1,57%	0,331	0,010	3,17%	0,345	0,012	3,40%
	0,201	0,011	5,50%	0,240	0,009	3,57%	0,321	0,002	0,64%	0,346	0,011	3,04%	0,360	0,011	3,09%

**Tabela B7:** Dados do ensaio de flexão por três pontos das amostras produzidas com CPIII-RS.

Amostra	Idade (dias)	Altura (mm)	Comp. (mm)	Largura (mm)	Carga (N)	Tensão (MPa)
III-R-1	7	40,80	40,20	160,80	3.903,06	5,83
III-R-2	7	41,00	40,20	160,90	3.522,40	5,21
III-R-3	7	41,10	40,20	160,80	3.200,34	4,71
III-20-1-1	7	40,70	40,40	161,00	3.795,67	5,67
III-20-1-2	7	40,70	40,00	161,50	3.501,99	5,29
III-20-1-3	7	40,50	40,30	162,00	3.503,32	5,30
III-40-1-1	7	40,70	40,60	161,30	3.131,34	4,66
III-40-1-2	7	40,30	40,20	161,90	3.591,59	5,50
III-40-1-3	7	40,60	40,20	162,90	3.171,59	4,79
III-20-2-1	7	40,10	39,70	160,40	3.193,62	5,00
III-20-2-2	7	40,00	40,00	160,20	3.393,84	5,30
III-20-2-3	7	40,30	39,90	160,20	3.533,46	5,45
III-40-2-1	7	40,70	40,30	161,40	3.132,49	4,69
III-40-2-2	7	40,00	39,60	161,00	2.843,05	4,49
III-40-2-3	7	40,80	40,80	160,80	3.362,56	4,95
III-R-1	28	42,00	40,00	163,80	4.196,22	5,95
III-R-2	28	40,80	40,10	164,60	4.691,98	7,03
III-R-3	28	40,80	40,20	166,10	4.474,50	6,69
III-20-1-1	28	41,10	40,60	161,00	4.936,27	7,20
III-20-1-2	28	40,20	40,70	160,50	4.634,76	7,05
III-20-1-3	28	40,70	40,30	160,70	4.267,79	6,39
III-40-1-1	28	40,50	40,40	160,10	3.898,33	5,88
III-40-1-2	28	40,60	40,50	160,50	3.914,93	5,86
III-40-1-3	28	40,50	40,50	160,40	3.764,39	5,67
III-20-2-1	28	40,40	40,30	160,50	4.617,12	7,02
III-20-2-2	28	40,40	40,20	160,70	4.353,62	6,64
III-20-2-3	28	40,20	40,00	160,40	3.270,77	5,06
III-40-2-1	28	40,20	39,70	160,40	3.119,23	4,86
III-40-2-2	28	40,20	40,00	160,50	3.763,58	5,82
III-40-2-3	28	40,30	40,00	160,70	3.463,27	5,33
III-R-1	91	40,50	40,00	160,20	6.008,15	9,16
III-R-2	91	41,20	40,60	160,30	4.618,45	6,70
III-R-3	91	41,00	40,00	160,70	4.887,49	7,27
III-20-1-1	91	40,50	40,20	160,00	4.752,83	7,21
III-20-1-2	91	40,10	40,10	160,80	5.375,62	8,34
III-20-1-3	91	40,70	40,20	160,50	4.773,28	7,17
III-40-1-1	91	41,00	40,20	160,70	4.449,75	6,58
III-40-1-2	91	41,10	40,30	160,10	4.800,70	7,05
III-40-1-3	91	41,90	40,20	160,90	5.582,62	7,91
III-20-2-1	91	40,30	40,00	160,40	4.663,56	7,18
III-20-2-2	91	40,80	40,20	160,30	5.560,21	8,309
III-20-2-3	91	40,40	40,30	161,30	4.678,92	7,11
III-40-2-1	91	40,60	40,30	160,40	3.877,07	5,84
III-40-2-2	91	41,00	40,10	160,50	4.554,80	6,76
III-40-2-3	91	40,50	40,50	160,70	3.276,73	4,93

**Tabela B8:** Dados do ensaio de flexão por três pontos das amostras produzidas com CPV-ARI.

Amostra	Idade (dias)	Altura (mm)	Comp. (mm)	Largura (mm)	Carga (N)	Tensão (MPa)
V-R-1	7	40,50	39,80	160,30	4.538,49	6,95
V-R-2	7	40,90	40,30	160,40	3.456,88	5,13
V-R-3	7	41,00	40,50	159,30	3.757,76	5,52
V-20-1-1	7	40,40	40,40	160,30	3.867,67	5,87
V-20-1-2	7	40,00	40,00	160,70	3.750,56	5,86
V-20-1-3	7	40,20	39,90	161,10	3.619,86	5,61
V-40-1-1	7	40,00	40,00	160,40	3.452,11	5,39
V-40-1-2	7	40,70	40,00	160,50	3.525,35	5,32
V-40-1-3	7	40,50	40,50	160,00	3.846,93	5,79
V-20-2-1	7	40,00	38,80	160,60	3.307,68	5,33
V-20-2-2	7	40,60	40,00	160,70	3.466,27	5,26
V-20-2-3	7	39,70	39,60	160,60	3.638,41	5,83
V-40-2-1	7	39,90	39,80	160,30	3.537,99	5,58
V-40-2-2	7	40,20	39,70	160,20	3.249,22	5,06
V-40-2-3	7	40,20	40,00	159,90	3.218,08	4,98
V-R-1	28	40,40	40,40	160,30	5.829,14	8,84
V-R-2	28	40,30	40,30	160,50	5.981,62	9,14
V-R-3	28	40,80	40,40	160,20	5.798,91	8,62
V-20-1-1	28	40,60	40,40	161,20	5.528,26	8,30
V-20-1-2	28	40,80	40,10	160,80	5.573,80	8,35
V-20-1-3	28	41,00	40,50	160,60	5.095,72	7,48
V-40-1-1	28	40,90	40,30	162,00	5.633,88	8,36
V-40-1-2	28	40,30	40,20	161,00	6.013,30	9,21
V-40-1-3	28	40,40	40,20	161,60	5.115,41	7,80
V-20-2-1	28	40,40	40,30	160,40	6.076,57	9,24
V-20-2-2	28	40,70	40,00	160,30	6.018,02	9,08
V-20-2-3	28	40,30	40,00	160,30	5.131,96	7,90
V-40-2-1	28	40,40	40,20	160,20	5.658,48	8,62
V-40-2-2	28	40,10	40,00	160,40	5.653,67	8,79
V-40-2-3	28	40,00	40,00	160,10	4.308,65	6,73
V-R-1	91	40,80	40,50	160,30	5.128,48	7,61
V-R-2	91	40,70	40,30	160,70	5.579,28	8,36
V-R-3	91	41,00	40,20	160,70	5.576,04	8,25
V-20-1-1	91	40,40	40,00	160,70	5.473,04	8,38
V-20-1-2	91	41,00	40,70	161,00	4.258,11	6,22
V-20-1-3	91	40,20	40,70	160,80	4.510,21	6,86
V-40-1-1	91	40,80	40,50	160,20	5.624,29	8,34
V-40-1-2	91	40,70	40,40	160,40	5.334,00	7,97
V-40-1-3	91	40,50	40,40	160,20	5.298,47	8,00
V-20-2-1	91	40,80	40,20	160,10	5.498,36	8,22
V-20-2-2	91	40,50	40,00	160,70	4.095,46	6,24
V-20-2-3	91	41,00	40,00	161,00	5.209,73	7,75
V-40-2-1	91	40,70	40,20	161,00	5.337,38	8,02
V-40-2-2	91	40,70	40,20	160,30	5.465,89	8,21
V-40-2-3	91	40,00	40,00	160,30	5.080,37	7,94

**Tabela B9:** Tabela resumo da flexão por três pontos das argamassas.

Amostra	Idade (dias)	Resistência (MPa)	Desvio (MPa)	CV
III-R	7	5,25	0,46	8,72%
III-20-1		5,42	0,18	3,30%
III-40-1		4,98	0,37	7,46%
III-20-2		5,25	0,19	3,56%
III-40-2		4,71	0,19	4,03%
III-R	28	6,55	0,45	6,89%
III-20-1		6,88	0,35	5,08%
III-40-1		5,80	0,10	1,69%
III-20-2		6,24	0,85	13,59%
III-40-2		5,34	0,39	7,34%
III-R	91	7,71	1,05	13,62%
III-20-1		7,57	0,54	7,16%
III-40-1		7,18	0,55	7,64%
III-20-2		7,53	0,55	7,28%
III-40-2		5,84	0,74	12,75%
V-R	7	5,87	0,78	13,37%
V-20-1		5,78	0,12	2,03%
V-40-1		5,50	0,21	3,76%
V-20-2		5,47	0,25	4,66%
V-40-2		5,21	0,27	5,13%
V-R	28	8,87	0,21	2,39%
V-20-1		8,05	0,40	4,93%
V-40-1		8,45	0,58	6,88%
V-20-2		8,74	0,60	6,84%
V-40-2		8,05	0,93	11,60%
V-R	91	8,07	0,33	4,11%
V-20-1		7,15	0,91	12,67%
V-40-1		8,10	0,17	2,09%
V-20-2		7,40	0,84	11,38%
V-40-2		8,05	0,11	1,41%

**Tabela B10:** Dados do ensaio de resistência a compressão axial das amostras produzidas com CPIII-RS.

Amostra	7 dias		28 dias		91 dias	
	Carga (N)	Tensão (MPa)	Carga (N)	Tensão (MPa)	Carga (N)	Tensão (MPa)
III-R-1.1	50.240,00	31,40	54.929,10	34,33	72.716,40	45,45
III-R-1.2	52.686,30	32,93	48.113,00	30,07	78.365,40	48,98
III-R-2.1	61.515,30	38,45	48.963,90	30,60	72.882,10	45,55
III-R-2.2	57.247,50	35,78	59.688,60	37,31	69.449,50	43,41
III-R-3.1	59.567,60	37,23	56.409,80	35,26	70.291,00	43,93
III-R-3.2	51.716,30	32,32	55.676,70	34,80	72.593,90	45,37
III-20-1-1.1	57.533,50	35,96	62.606,70	39,13	75.974,10	47,48
III-20-1-1.2	60.707,10	37,94	61.745,60	38,59	77.468,40	48,42
III-20-1-2.1	57.587,90	35,99	62.563,70	39,10	64.996,40	40,62
III-20-1-2.2	60.052,60	37,53	59.834,10	37,40	80.968,30	50,61
III-20-1-3.1	62.443,60	39,03	59.827,10	37,39	83.354,70	52,10
III-20-1-3.2	53.520,40	33,45	65.759,70	41,10	76.518,70	47,82
III-40-1-1.1	50.289,70	31,43	59.361,40	37,10	72.037,80	45,02
III-40-1-1.2	58.446,50	36,53	55.246,70	34,53	68.053,60	42,53
III-40-1-2.1	58.355,50	36,47	59.813,10	37,38	65.917,70	41,20
III-40-1-2.2	61.635,80	38,52	61.058,30	38,16	66.462,40	41,54
III-40-1-3.1	58.191,10	36,37	61.982,60	38,74	65.389,50	40,87
III-40-1-3.2	62.302,50	38,94	59.613,20	37,26	59.037,30	36,90
III-20-2-1.1	51.786,00	32,37	55.091,10	34,43	73.979,10	46,24
III-20-2-1.2	55.195,70	34,50	50.162,00	31,35	68.356,00	42,72
III-20-2-2.1	54.589,60	34,12	57.569,10	35,98	74.636,80	46,65
III-20-2-2.2	52.416,00	32,76	57.950,70	36,22	63.878,60	39,92
III-20-2-3.1	51.880,70	32,43	59.650,10	37,28	63.409,90	39,63
III-20-2-3.2	54.552,90	34,10	53.447,60	33,40	63.191,50	39,49
III-40-2-1.1	49.095,60	30,68	53.496,80	33,44	63.015,50	39,38
III-40-2-1.2	55.427,80	34,64	52.143,70	32,59	56.444,70	35,28
III-40-2-2.1	57.585,80	35,99	52.058,70	32,54	59.278,00	37,05
III-40-2-2.2	53.969,40	33,73	54.147,60	33,84	63.245,20	39,53
III-40-2-3.1	53.253,40	33,28	50.922,70	31,83	55.856,80	34,91
III-40-2-3.2	49.598,60	31,00	53.972,20	33,73	57.708,80	36,07

**Tabela B11:** Dados do ensaio de resistência a compressão axial das amostras produzidas com CPV-ARI.

Amostra	7 dias		28 dias		91 dias	
	Carga	Tensão	Carga	Tensão	Carga	Tensão
	(N)	(MPa)	(N)	(MPa)	(N)	(MPa)
V-R-1.1	86.144,50	53,84	88.893,60	55,56	85.049,60	53,16
V-R-1.2	81.694,70	51,06	70.348,50	43,97	88.981,50	55,61
V-R-2.1	78.347,60	48,97	87.759,20	54,85	85.616,20	53,51
V-R-2.2	88.643,00	55,40	95.935,60	59,96	89.237,60	55,77
V-R-3.1	88.031,70	55,02	94.487,90	59,05	84.745,70	52,97
V-R-3.2	87.279,80	54,55	90.801,50	56,75	90.982,40	56,86
V-20-1-1.1	79.149,60	49,47	98.351,30	61,47	98.647,60	61,65
V-20-1-1.2	77.659,00	48,54	90.035,50	56,27	100.946,00	63,09
V-20-1-2.1	85.786,50	53,62	91.553,70	57,22	76.484,30	47,80
V-20-1-2.2	74.651,50	46,66	69.823,90	43,64	93.779,10	58,61
V-20-1-3.1	74.277,00	46,42	88.669,20	55,42	77.629,00	48,52
V-20-1-3.2	76.954,70	48,10	89.189,50	55,74	87.491,20	54,68
V-40-1-1.1	85.052,00	53,16	92.748,40	57,97	70.679,60	44,17
V-40-1-1.2	85.492,80	53,43	88.273,60	55,17	86.118,60	53,82
V-40-1-2.1	83.516,20	52,20	92.600,10	57,88	83.012,90	51,88
V-40-1-2.2	84.402,00	52,75	84.542,50	52,84	82.408,60	51,51
V-40-1-3.1	85.023,40	53,14	92.214,40	57,63	96.357,50	60,22
V-40-1-3.2	84.246,00	52,65	86.788,50	54,24	87.445,00	54,65
V-20-2-1.1	75.861,40	47,41	78.953,50	49,35	77.872,30	48,67
V-20-2-1.2	76.372,90	47,73	70.968,30	44,36	81.395,80	50,87
V-20-2-2.1	75.034,00	46,90	85.642,40	53,53	74.604,30	46,63
V-20-2-2.2	76.362,10	47,73	81.685,50	51,05	89.697,80	56,06
V-20-2-3.1	78.727,90	49,20	68.815,70	43,01	95.892,80	59,93
V-20-2-3.2	78.928,60	49,33	80.794,00	50,50	84.015,80	52,51
V-40-2-1.1	67.007,60	41,88	77.127,30	48,20	60.571,80	37,86
V-40-2-1.2	77.058,90	48,16	82.504,10	51,57	70.046,80	43,78
V-40-2-2.1	68.065,90	42,54	80.273,00	50,17	77.367,80	48,35
V-40-2-2.2	70.807,40	44,25	77.483,60	48,43	94.628,20	59,14
V-40-2-3.1	68.912,80	43,07	76.793,00	48,00	76.974,10	48,11
V-40-2-3.2	67.562,00	42,23	78.045,70	48,78	91.900,30	57,44

**Tabela B12:** Tabela resumo da resistência a compressão axial das argamassas.

Amostra	Idade (dias)	Resistência (MPa)	Desvio (MPa)	CV
III-R	7	34,68	2,62	7,56%
III-20-1		36,65	1,79	4,89%
III-40-1		36,38	2,44	6,70%
III-20-2		33,38	0,88	2,63%
III-40-2		33,22	1,89	5,67%
III-R	28	33,73	2,58	7,64%
III-20-1		38,79	1,26	3,24%
III-40-1		37,20	1,32	3,55%
III-20-2		34,78	1,98	5,70%
III-40-2		32,99	0,73	2,21%
III-R	91	45,45	1,95	4,28%
III-20-1		47,84	3,61	7,55%
III-40-1		41,34	2,42	5,84%
III-20-2		42,44	3,03	7,14%
III-40-2		37,04	1,84	4,96%
V-R	7	53,14	2,34	4,40%
V-20-1		48,80	2,40	4,91%
V-40-1		52,89	0,40	0,77%
V-20-2		48,05	0,91	1,88%
V-40-2		43,69	2,14	4,89%
V-R	28	55,02	5,26	9,56%
V-20-1		54,96	5,45	9,92%
V-40-1		55,95	1,99	3,56%
V-20-2		48,63	3,74	7,68%
V-40-2		49,19	1,27	2,59%
V-R	91	54,65	1,50	2,74%
V-20-1		55,73	5,97	10,71%
V-40-1		52,71	4,77	9,05%
V-20-2		52,45	4,47	8,52%
V-40-2		49,11	7,38	15,02%

**Tabela B13:** Dados do ensaio de carbonatação acelerada das amostras produzidas com CPIII-RS, expostos a atmosfera concentrada em CO<sub>2</sub> por 28 dias.

28 dias				
III-R-1 (mm)	III-20-1 (mm)	III-40-1 (mm)	III-20-2 (mm)	III-40-2 (mm)
9,09	5,75	8,64	12,98	14,40
9,19	6,57	9,00	11,92	15,20
9,47	6,98	9,81	13,07	14,60
10,61	8,93	10,44	12,90	19,40
11,08	5,75	8,37	18,05	21,70
11,18	5,34	10,44	13,88	13,40
6,92	5,54	12,14	12,01	9,80
7,20	5,44	10,43	13,61	8,41
7,96	6,46	11,15	10,85	9,20
8,43	5,95	13,76	10,68	10,60
8,53	6,05	12,14	11,12	12,20
9,00	6,98	11,51	11,12	22,80
7,58	8,21	10,25	10,94	20,50
7,48	5,64	9,53	8,98	15,90
5,97	6,46	8,46	7,92	15,30
7,20	5,44	8,37	7,29	14,51
8,62	7,08	10,97	12,19	12,20
8,43	7,18	12,14	9,25	11,60
8,81	8,11	12,05	9,78	12,40
7,10	6,57	11,69	12,81	13,90
7,49	9,95	11,24	12,54	16,60
7,48	9,64	11,96	12,10	14,50
7,58	9,64	11,24	11,38	15,20
7,58	8,93	10,61	13,43	15,31
8,62	8,52	8,55	10,58	14,40
8,24	8,62	10,52	9,87	15,00
7,58	7,80	10,43	8,45	17,10
7,77	9,95	9,72	6,94	16,40
9,10	6,47	10,61	13,70	12,40
9,76	5,75	12,05	12,90	14,00
8,62	7,49	10,88	13,52	12,10
8,15	5,95	9,89	15,21	13,20

**Tabela B14:** Dados do ensaio de carbonatação acelerada das amostras produzidas com CPIII-RS, expostos a atmosfera concentrada em CO<sub>2</sub> por 56 dias.

56 dias				
III-R-1 (mm)	III-20-1 (mm)	III-40-1 (mm)	III-20-2 (mm)	III-40-2 (mm)
10,34	12,21	10,22	18,92	18,20
10,70	11,73	9,69	16,33	18,02
10,43	11,73	10,83	16,69	17,55
12,07	10,27	13,10	17,22	21,92
8,96	9,95	10,65	15,44	18,58
8,42	10,84	9,61	16,51	16,63
9,15	11,89	8,91	16,51	16,72
9,51	12,78	9,35	17,94	15,98
10,34	13,59	8,91	18,20	14,86
11,43	11,16	10,22	16,86	16,72
9,97	12,21	11,35	16,24	17,65
10,15	11,24	13,62	16,15	19,42
10,15	6,79	12,75	14,99	18,67
9,42	9,46	9,87	14,81	16,44
9,33	9,46	7,77	14,19	16,26
9,42	9,30	9,78	17,05	17,83
12,17	12,13	8,21	11,96	19,41
9,88	11,56	10,92	11,15	17,55
9,42	9,71	11,35	12,49	16,90
10,25	9,30	13,54	14,37	17,74
10,61	8,17	13,10	17,67	19,88
9,79	8,73	9,35	15,35	20,90
10,43	11,24	10,13	15,35	22,29
10,79	10,68	10,13	14,01	18,95
12,17	10,67	11,35	10,44	16,81
11,80	11,00	10,57	11,60	17,18
11,16	7,28	9,96	12,40	16,63
12,07	5,98	12,84	13,92	19,60
11,34	8,41	15,37	19,45	20,81
10,79	9,95	12,58	16,78	24,15
11,25	11,24	12,32	15,88	20,99
11,98	12,86	11,88	14,19	20,34

**Tabela B15:** Dados do ensaio de carbonatação acelerada das amostras produzidas com CPIII-RS, expostos a atmosfera concentrada em CO<sub>2</sub> por 91 dias.

91 dias				
III-R-1	III-20-1	III-40-1	III-20-2	III-40-2
13,74	10,18	17,22	20,05	20,05
13,48	11,48	16,17	17,05	21,30
12,40	12,68	15,22	16,00	23,87
12,04	13,55	12,87	15,38	25,70
6,11	11,22	9,83	14,77	19,88
8,80	10,01	9,30	13,45	20,13
9,88	6,47	10,87	13,27	18,80
10,78	9,23	13,13	16,61	18,22
13,74	11,22	13,04	19,78	18,47
12,31	9,32	11,48	16,79	18,63
10,33	11,65	10,61	16,88	21,63
8,17	12,34	9,74	19,16	22,79
10,25	10,96	12,43	15,47	24,29
10,78	10,70	13,83	13,80	22,96
11,86	9,75	15,48	17,41	19,13
12,94	7,33	17,04	18,72	18,97
13,65	12,68	15,48	16,70	19,63
11,59	17,43	15,56	13,80	18,97
11,14	15,87	14,43	13,36	20,63
11,14	13,81	13,83	14,50	22,63
11,32	13,46	13,56	16,09	22,21
11,59	13,89	13,30	16,09	19,05
12,13	12,94	15,48	17,32	18,89
13,47	10,87	16,44	20,13	17,14
13,47	7,59	15,65	18,90	14,64
11,32	9,92	13,48	17,58	16,14
12,76	9,49	10,70	15,74	16,05
13,30	11,73	11,65	15,83	19,97
11,68	13,46	14,35	16,35	23,38
11,23	11,22	16,00	15,74	20,38
12,67	12,51	15,83	15,74	19,22
13,38	11,39	16,00	19,08	19,97

**Tabela B16:** Tabela resumo da carbonatação acelerada das argamassas.

	28			56			91		
	Carbonatação (mm)	Desvio	CV	Carbonatação (mm)	Desvio	CV	Carbonatação (mm)	Desvio	CV
III-R-1	8,37	1,17	13,95%	10,49	1,02	9,69%	11,67	1,71	14,68%
III-20-1	7,16	1,45	20,24%	10,42	1,78	17,04%	11,45	2,28	19,94%
III-40-1	10,59	1,31	12,39%	10,94	1,73	15,82%	13,75	2,24	16,33%
III-20-2	11,62	2,32	19,93%	15,34	2,23	14,56%	16,49	1,94	11,77%
III-40-2	14,51	3,26	22,45%	18,49	2,07	11,19%	20,12	2,45	12,18%

**Tabela B17:** Dados do ensaio de retração por secagem das amostras produzidas com CPIII-RS.

Amostra	1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias	120 dias
III-R-1	3,815	3,627	3,578	3,558	3,526	3,510	3,507
III-R-2	4,085	3,885	3,856	3,832	3,803	3,777	3,776
III-R-3	3,137	2,926	2,904	2,884	2,854	2,838	2,836
III-20-1-1	1,878	1,694	1,655	1,641	1,609	1,589	1,587
III-20-1-2	0,990	0,823	0,809	0,783	0,752	0,725	0,724
III-20-1-3	-0,177	-0,373	-0,403	-0,430	-0,454	-0,480	-0,481
III-40-1-1	2,782	2,601	2,557	2,549	2,517	2,491	2,489
III-40-1-2	1,631	1,431	1,391	1,383	1,351	1,331	1,330
III-40-1-3	3,889	3,701	3,666	3,654	3,627	3,601	3,601
III-20-2-1	-0,644	-0,867	-0,905	-0,921	-0,944	-0,968	-0,964
III-20-2-2	0,017	-0,198	-0,238	-0,253	-0,278	-0,302	-0,302
III-20-2-3	0,491	0,299	0,263	0,238	0,192	0,160	0,171
III-40-2-1	4,554	4,311	4,297	4,265	4,241	4,218	4,214
III-40-2-2	3,315	3,048	3,042	2,996	2,979	2,959	2,952
III-40-2-3	2,861	2,619	2,606	2,567	2,554	2,534	2,527

**Tabela B18:** Dados do ensaio de retração por secagem das amostras produzidas com CPV-ARI.

Amostra	1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias	120 dias
V-R-1	1,979	1,763	1,759	1,708	1,683	1,659	1,654
V-R-2	3,047	2,822	2,807	2,765	2,742	2,719	2,711
V-R-3	3,053	2,826	2,816	2,768	2,747	2,719	2,715
V-20-1-1	3,337	3,138	3,114	3,077	3,053	3,025	3,021
V-20-1-2	6,171	5,965	5,943	5,901	5,879	5,847	5,845
V-20-1-3	3,676	3,495	3,474	3,428	3,407	3,371	3,373
V-40-1-1	0,520	0,341	0,331	0,295	0,266	0,244	0,242
V-40-1-2	0,447	0,250	0,244	0,199	0,169	0,132	0,129
V-40-1-3	1,260	1,098	1,078	1,049	1,029	1,006	1,004
V-20-2-1	3,311	3,099	3,074	3,025	3,008	2,990	2,987
V-20-2-2	2,851	2,616	2,596	2,537	2,522	2,504	2,498
V-20-2-3	1,910	1,664	1,650	1,580	1,567	1,549	1,541
V-40-2-1	3,251	2,964	2,965	2,916	2,896	2,879	2,880
V-40-2-2	4,481	4,184	4,173	4,115	4,095	4,076	4,071
V-40-2-3	3,297	3,022	2,998	2,932	2,911	2,891	2,883

**Tabela B19:** Tabela resumo da retração por secagem das argamassas.

	7			14			28			56			91			120		
	Retração	Desvio	CV															
III-R	-0,809	0,039	4,82%	-0,945	0,014	1,45%	-1,031	0,007	0,72%	-1,154	0,012	1,08%	-1,232	0,013	1,07%	-1,240	0,012	1,01%
III-20-1	-0,748	0,050	6,71%	-0,861	0,085	9,84%	-0,953	0,080	8,37%	-1,072	0,070	6,54%	-1,171	0,066	5,66%	-1,177	0,067	5,65%
III-40-1	-0,772	0,034	4,39%	-0,933	0,034	3,66%	-0,971	0,030	3,10%	-1,095	0,036	3,29%	-1,192	0,025	2,11%	-1,196	0,026	2,20%
III-20-2	-0,864	0,056	6,43%	-1,021	0,061	5,96%	-1,098	0,043	3,96%	-1,227	0,010	0,80%	-1,336	0,019	1,43%	-1,316	0,004	0,31%
III-40-2	-1,017	0,048	4,69%	-1,061	0,033	3,14%	-1,219	0,055	4,49%	-1,292	0,051	3,96%	-1,378	0,049	3,57%	-1,402	0,051	3,65%
V-R	-0,906	0,018	1,95%	-0,946	0,034	3,59%	-1,137	0,022	1,96%	-1,231	0,016	1,28%	-1,332	0,021	1,57%	-1,355	0,021	1,52%
V-20-1	-0,789	0,040	5,08%	-0,880	0,043	4,91%	-1,048	0,032	3,09%	-1,138	0,035	3,05%	-1,268	0,026	2,06%	-1,273	0,033	2,62%
V-40-1	-0,736	0,060	8,10%	-0,785	0,037	4,68%	-0,935	0,064	6,81%	-1,044	0,080	7,68%	-1,156	0,105	9,08%	-1,165	0,107	9,16%
V-20-2	-0,940	0,060	6,35%	-1,020	0,042	4,15%	-1,262	0,077	6,09%	-1,323	0,070	5,32%	-1,396	0,071	5,05%	-1,419	0,079	5,56%
V-40-2	-1,161	0,034	2,95%	-1,207	0,035	2,91%	-1,440	0,057	3,93%	-1,524	0,058	3,80%	-1,599	0,062	3,90%	-1,615	0,077	4,77%

**Tabela B20:** Dados do ensaio de retração autógena das amostras produzidas com CIII-RS.

Amostra	1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias	120 dias
III-R-1	5,532	5,517	5,501	5,476	5,434	5,404	5,381
III-R-2	6,280	6,264	6,249	6,220	6,169	6,132	6,110
III-R-3	4,941	4,925	4,908	4,883	4,838	4,797	4,770
III-20-1-1	6,383	6,352	6,334	6,312	6,269	6,230	6,212
III-20-1-2	5,510	5,472	5,443	5,427	5,387	5,354	5,342
III-20-1-3	4,697	4,671	4,658	4,636	4,585	4,546	4,523
III-40-1-1	6,360	6,316	6,306	6,287	6,223	6,168	6,157
III-40-1-2	6,079	6,040	6,027	6,002	5,936	5,880	5,873
III-40-1-3	7,518	7,486	7,470	7,444	7,376	7,319	7,314
III-20-2-1	6,760	6,729	6,722	6,696	6,633	6,583	6,570
III-20-2-2	7,639	7,605	7,597	7,572	7,503	7,451	7,440
III-20-2-3	6,393	6,355	6,345	6,318	6,250	6,197	6,187
III-40-2-1	8,152	8,117	8,104	8,087	8,011	7,945	7,933
III-40-2-2	6,170	6,132	6,119	6,085	6,017	5,959	5,948
III-40-2-3	5,794	5,759	5,748	5,716	5,641	5,580	5,568

**Tabela B21:** Dados do ensaio de retração autógena das amostras produzidas com CPV-ARI.

Amostra	1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	56 dias	91 dias	120 dias
V-R-1	7,142	7,101	7,079	7,060	7,031	6,992	6,958
V-R-2	5,163	5,126	5,103	5,083	5,056	5,024	4,992
V-R-3	5,854	5,815	5,792	5,773	5,745	5,710	5,677
V-20-1-1	4,081	4,058	4,042	4,023	4,000	3,959	3,924
V-20-1-2	3,746	3,716	3,696	3,686	3,666	3,640	3,608
V-20-1-3	5,108	5,081	5,062	5,052	5,032	5,011	4,986
V-40-1-1	2,086	2,057	2,046	2,032	2,013	1,975	1,944
V-40-1-2	1,979	1,948	1,930	1,915	1,895	1,868	1,835
V-40-1-3	5,164	5,125	5,106	5,100	5,073	5,049	5,017
V-20-2-1	4,411	4,393	4,381	4,368	4,344	4,311	4,299
V-20-2-2	5,513	5,491	5,475	5,464	5,446	5,414	5,398
V-20-2-3	5,275	5,254	5,236	5,223	5,203	5,160	5,142
V-40-2-1	3,707	3,682	3,673	3,656	3,622	3,567	3,550
V-40-2-2	4,634	4,609	4,600	4,583	4,556	4,519	4,503
V-40-2-3	6,283	6,252	6,238	6,223	6,194	6,155	6,137

**Tabela B22:** Tabela resumo da retração autógena das argamassas.

	7			14			28			56			91			120		
	Retração	Desvio	CV	Retração	Desvio	CV	Retração	Desvio	CV	Retração	Desvio	CV	Retração	Desvio	CV	Retração	Desvio	CV
III-R	-0,062	0,002	2,96%	-0,126	0,003	2,32%	-0,232	0,007	3,17%	-0,417	0,023	5,50%	-0,562	0,036	6,44%	-0,658	0,038	5,83%
III-20-1	-0,128	0,020	15,75%	-0,209	0,047	22,63%	-0,290	0,037	12,76%	-0,470	0,020	4,31%	-0,620	0,010	1,56%	-0,691	0,008	1,21%
III-40-1	-0,158	0,020	12,84%	-0,211	0,010	4,86%	-0,307	0,007	2,28%	-0,579	0,011	1,87%	-0,809	0,014	1,68%	-0,841	0,005	0,61%
III-20-2	-0,138	0,011	8,23%	-0,172	0,016	9,51%	-0,277	0,018	6,66%	-0,546	0,026	4,69%	-0,754	0,030	4,02%	-0,799	0,025	3,16%
III-40-2	-0,145	0,006	4,02%	-0,195	0,009	4,49%	-0,307	0,033	10,73%	-0,601	0,021	3,48%	-0,850	0,008	0,95%	-0,897	0,008	0,86%
V-R	-0,157	0,006	3,86%	-0,248	0,004	1,72%	-0,325	0,002	0,69%	-0,438	0,005	1,17%	-0,579	0,016	2,79%	-0,712	0,019	2,67%
V-20-1	-0,108	0,012	10,81%	-0,182	0,018	10,14%	-0,235	0,007	3,04%	-0,319	0,009	2,94%	-0,438	0,042	9,68%	-0,562	0,059	10,44%
V-40-1	-0,134	0,017	12,47%	-0,199	0,029	14,47%	-0,246	0,019	7,52%	-0,336	0,029	8,50%	-0,457	0,006	1,28%	-0,587	0,006	1,04%
V-20-2	-0,082	0,007	8,18%	-0,144	0,016	11,13%	-0,193	0,015	7,64%	-0,277	0,009	3,38%	-0,422	0,029	6,94%	-0,484	0,037	7,59%
V-40-2	-0,109	0,011	10,05%	-0,152	0,020	13,33%	-0,218	0,016	7,44%	-0,339	0,018	5,20%	-0,515	0,042	8,17%	-0,584	0,044	7,51%