

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Cura interna de compósitos cimentícios ecoeficientes com
areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar por meio de
polímeros superabsorventes**

Thiago Alex Hemkemeier

São Carlos - SP

2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Cura interna de compósitos cimentícios ecoeficientes com
areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar por meio de
polímeros superabsorventes**

Thiago Alex Hemkemeier

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos como um dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Almir Sales

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando C. R. Almeida

São Carlos - SP

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Thiago Alex Hemkemeier, realizada em 07/05/2024.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Almir Sales (UFSCar)

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira (UFSCar)

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro (EESC/USP)

Profa. Dra. Dayana Cristina Silva Garcia (UFMG)

Profa. Dra. Juliana Petermann Moretti (UNIFESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

HEMKEMEIER, T. A. **Cura interna de compósitos cimentícios ecoeficientes com areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar por meio de polímeros superabsorventes.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2024.

Resumo

A alta geração de resíduos agroindustriais, como a Areia de Cinza do Bagaço de Cana-de-Açúcar (ACBC), tem despertado notável interesse na construção civil, principalmente na busca por soluções ecoeficientes que possam mitigar problemas associados à exploração excessiva de recursos naturais, como a areia. Entretanto, devido ao refinamento da microestrutura dos compósitos cimentícios proporcionado pela ACBC, destaca-se a importância em avaliar o comportamento de retração dessas matrizes, uma vez que esse processo tende a ser mais pronunciado em matrizes cimentícias mais densas. Nesse sentido, este estudo avaliou a retração plástica, autógena e por secagem, bem como as propriedades físico-mecânicas de argamassas contendo 30% de ACBC em substituição ao agregado natural em conjunto com três tipos de Polímeros Superabsorventes (PSAs), materiais explorados como agentes de cura interna, e dois tipos de cimentos (CP V ARI 32 e CP III 32). Os resultados mais expressivos na presença de apenas ACBC, sem polímeros, foi a redução de 18,10% (CP V ARI) e 18,48% (CP III) da retração autógena. O PSA que promoveu a maior redução nas espessuras médias das fissuras indicou uma diminuição de 81,92% e 39,88%, com os cimentos CP V ARI e CP III, respectivamente, no ensaio de retração plástica. Adicionalmente, foi observada a eficácia dos PSAs como agentes de cura interna, principalmente na presença do cimento CP III, reduzindo em até 119,19% a retração autógena. E referente à retração por secagem, apenas o PSA com menor capacidade de absorção indicou uma redução significativa (24,78%), com o cimento CP III. Não foi detectada nenhuma influência negativa dos PSAs no ensaio de resistência à tração na flexão. Contudo, o PSA com capacidade de absorção intermediária proporcionou uma redução de 19% (CP V ARI) e 28,55% (CP III) na resistência à compressão. Portanto, a utilização da ACBC em conjunto com PSAs pode trazer benefícios consideráveis às argamassas, especialmente no que diz respeito à redução de fissuras provenientes, sobretudo, das retrações plástica e autógena.

Palavras-chave: polímeros superabsorventes (PSA), areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC), retração plástica, retração autógena, retração por secagem, cura interna.

HEMKEMEIER, T. A. **Internal curing of eco-efficient cementitious composites with sugarcane bagasse ash sand by superabsorbent polymers.** Thesis (Doctor degree). Federal University of São Carlos, São Carlos, 2023.

Abstract

The high generation of agro-industrial waste, such as Sugarcane Bagasse Ash Sand (SBAS), has aroused notable interest in civil construction, mainly in the search for eco-efficient solutions that can mitigate problems associated with the excessive exploitation of natural resources, as sand. However, due to the refinement of the microstructure of cementitious composites provided by SBAS, it is important to evaluate the shrinkage behavior of these matrices, since this process tends to be more pronounced in denser cementitious matrices. Thus, this study evaluated plastic, autogenous, and drying shrinkage, as well as the physical-mechanical properties of mortars containing 30% SBAS replacing fine aggregate with three types of Superabsorbent Polymers (SAPs), materials explored as agents of internal curing, and two types of cement (CP V ARI and CP III). The most significant results in the presence of only SBAS, without polymers, were the reduction of 18.10% (CP V ARI) and 18.48% (CP III) of autogenous shrinkage. The SAP that promoted the greatest reduction in the average crack thickness indicated a decrease of 81.92% and 39.88%, with the CP V ARI and CP III cement, respectively, in the plastic shrinkage test. Additionally, the effectiveness of SAPs as internal curing agents was observed, especially in the presence of CP III cement, reducing autogenous shrinkage by up to 119.19%. About drying shrinkage, only the SAP with the lowest absorption capacity indicated a significant reduction (24.78%), with CP III cement. No negative influence of SAPs was detected in the flexural strength test. However, SAP with intermediate absorption capacity provided a reduction of 19% (CP V ARI) and 28.55% (CP III) in compressive strength. Therefore, the use of SBAS in with SAPs can bring considerable benefits to mortars, especially in the reduction of cracks arising, mainly, from plastic and autogenous shrinkage.

Keywords: superabsorbent polymers (SAPs), sugarcane bagasse ash sand (SBAS), plastic shrinkage, autogenous shrinkage, drying shrinkage, internal curing.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGECiv) pela oportunidade em aprofundar os conhecimentos e possibilitar o desenvolvimento do Doutorado. O apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) também foi essencial para a realização deste trabalho. Agradeço aos membros da banca, Professoras Dra. Fernanda Giannotti, Dra. Alessandra de Castro, Dra. Dayana Garcia e Dra. Juliana Moretti, por todas as contribuições em prol de um trabalho de excelência.

Quero também expressar a minha gratidão pelos conhecimentos ministrados, orientação, dedicação, paciência e ajuda prestada durante o processo de doutoramento pelo meu orientador Prof. Dr. Almir Sales e coorientador Prof. Dr. Fernando Almeida. Além disso, meus agradecimentos ao técnico do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), José Roberto, por todo apoio prestado durante o desenvolvimento do programa experimental desta pesquisa e aos membros do Laboratório de Química pelas análises prestadas. Agradeço também aos amigos e colegas de trabalho do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC), pela troca de informações e todo auxílio. Expresso minha mais profunda gratidão à minha família, aos meus pais, Martinho Aloisio Hemkemeier e Solange Maria Berwian, por todo apoio e incentivo, e irmãos Gustavo Alexandre Hemkemeier e Tharynn Alessandra Hemkemeier, pelas palavras de conforto nos momentos mais desafiadores. Um agradecimento especial à minha noiva, Patricia Trevisani Juchen, que sempre esteve presente, dando forças e compartilhando do seu vasto conhecimento na área acadêmica (minha segunda coorientadora). E aos meus sogros Carlos Roberto Juchen e Sandra Trevisani Juchen, pelo incentivo a cursar o Mestrado e Doutorado. Por fim, sou grato a Deus pela força, coragem e, acima de tudo, saúde para seguir até o fim frente aos desafios enfrentados ao longo do Doutorado. Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com esta etapa.

Aos meus pais, Martinho e Solange, e à minha noiva Patricia, cujo amor e apoio incondicional me impulsionam a enfrentar qualquer desafio.

Lista de Figuras

Figura 1 - Produção, rendimento e área colhida de cana-de-açúcar no Brasil entre 2000 e 2021	24
Figura 2 - Produção dos principais produtos agrícolas cultivados no mundo entre 2000 e 2018	25
Figura 3 - Formação do hidrogel: (a) amostra de PSA seca; (b), (c) e (d) evolução da absorção e espalhamento da amostra de PSA após contato com água.	29
Figura 4 - Base dos PSAs: (a) poliacrilamida e (b) ácido poliacrílico	38
Figura 5 - Representação esquemática do comportamento do PSA após contato com a água	40
Figura 6 - Representação esquemática dos vazios criados pelo colapso dos PSAs	49
Figura 7 - Etapas do Programa experimental.....	51
Figura 8 - Distribuição granulométrica dos agregados (ACBC, areia fina e areia média)	55
Figura 9 - MEV dos agregados: (a) ACBC (10 μm e 2 μm); (b) areia fina (200 μm e 20 μm); e (c) areia média (200 μm e 20 μm)	56
Figura 10 - Microscopia óptica dos agregados das argamassas (ampliação de 1000x): (a) ACBC; (b) areia fina; e (c) areia média	57
Figura 11 - PSAs antes e após o contato com a água com ampliação de 1000x: (a) PSA-A; (b) PSA-B; e (c) PSA-C	59
Figura 12 - Ensaio de absorção de água dos PSA: (a) saquinho de chá, (b) e (c) imersão em solução aquosa.....	60
Figura 13 - Nomenclatura das argamassas de acordo com o cimento e PSA utilizados	63
Figura 14 - Procedimento de mistura: (a) Adição dos Agregados; (b) Mistura seca dos agregados; (c) Mistura úmida dos agregados; e (d) Argamassa final com cimento ..	67

Figura 15 - Ensaio de consistência na mesa manual de consistência antes (a) e depois do espalhamento (b)	68
Figura 16 - Aparato experimental para medição dos tempos de pega por agulha de Vicat	69
Figura 17 - Esquema de montagem do molde para ensaio de retração plástica.....	71
Figura 18 - Dimensões do molde para ensaio de retração plástica.....	71
Figura 19 - Confeção dos moldes: (a) chapas metálicas; (b) peças em madeira compensada; (c) União entre chapas e suportes de madeira; (d) montagem final do molde	72
Figura 20 - Molde com argamassa para ensaio de retração plástica	73
Figura 21 - Desenvolvimento do ensaio de retração plástica: (a) moldes preparados; (b) molde com argamassa no estado fresco; (c) moldes armazenados em estufa ventilada ($40 \pm 3^{\circ}\text{C}$); (d) corpos de prova removidos do molde (após 24h de ensaio)	74
Figura 22 - Molde prismático para ensaio de retração autógena	75
Figura 23 - Dimensões do molde prismático para ensaio de retração autógena (mm)	76
Figura 24 - Etapas de moldagem dos corpos de prova prismáticos para ensaio de retração autógena até a cura inicial (a) Mistura; (b) Fixação dos pinos após aplicação de óleo; (c) aplicação da argamassa em duas camadas; (d) regularização da superfície; e (e) armazenamento em câmara seca	77
Figura 25 - Tipos de revestimento dos corpos de prova: (a) apenas parafina; (b) com papel alumínio e imersos em parafina; (c) com plástico filme e imersos em parafina; (d) com plástico filme e papel alumínio, pintados com parafina; (e) com papel alumínio pintado com parafina.....	78
Figura 26 - Aferição da variação dimensional por aparelho comparador	80
Figura 27 - Posicionamento dos corpos de prova armazenados em câmara seca ...	82

Figura 28 - Ensaio de retração por secagem: (a) CPs armazenados; e (b) aferição da variação dimensional.....	83
Figura 29 - Moldagem de corpos de prova para ensaios mecânicos: (a) molde com argamassa antes do adensamento; (b) equipamento para adensamento; (c) molde com argamassa após adensamento; e (d) corpos de prova após rasamento	84
Figura 30 - Corpos de prova após moldagem (a) e armazenados até a data de ruptura (b).....	84
Figura 31 - Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) ensaio em andamento; e (b) CP após rompimento.....	85
Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão: (a) após rompimento na célula de carga; e (b) CPs ensaiados	86
Figura 33 - Capacidade de absorção dos PSA em contato com água deionizada: (a) de 0 até 180 minutos e (b) de 1 a 3 dias	88
Figura 34 - Tempos de pega dos traços com cimento CP V ARI e CP III	91
Figura 35 - Corpos de Prova após 24h no ensaio de retração plástica - CP V	93
Figura 36 - Espessuras médias e desvios padrões das fissuras de cada traço (CP V ARI)	97
Figura 37 - Evolução das massas dos CPs ao longo do ensaio de retração plástica - CP V.....	98
Figura 38 - Relação entre a redução de massa (%) e a relação a/c tot. das misturas ao longo do ensaio de retração plástica - CP V ARI	99
Figura 39 - Corpos de Prova após 24h no ensaio de retração plástica - CP III.....	101
Figura 40 - Espessuras médias e desvios padrões das fissuras de cada traço (CP III)	105
Figura 41 - Evolução das massas dos CPs ao longo do ensaio de retração plástica - CP III	106
Figura 42 - Relação entre a redução de massa (%) e a relação a/c tot. das misturas ao longo do ensaio de retração plástica - CP III.....	107

Figura 43 - Comparação entre as espessuras médias e desvios padrões dos dois cimentos.....	108
Figura 44 - Retração autógena até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CP V ARI	110
Figura 45 - Relação entre a redução da retração autógena (%) e a relação a/c total de cada traço - CP V ARI	112
Figura 46 - Análise da retração autógena nas idades iniciais (até 14 dias) - CP V ARI	116
Figura 47 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração autógena - CP V ARI.....	118
Figura 48 - Comportamento das massas dos CPs sem revestimento.....	119
Figura 49 - Retração autógena até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CPIII.....	120
Figura 50 - Relação entre a redução da retração autógena (%) e a relação a/c total de cada traço - CP III	121
Figura 51 - Análise da retração autógena nas idades iniciais (até 14 dias) – CP III	124
Figura 52 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração autógena - CP III	125
Figura 53 - Retração autógena até 168 dias comparando o cimento CP V ARI com o CP III	126
Figura 54 - Retração por secagem até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CP V ARI	129
Figura 55 - Análise da retração por secagem nas idades iniciais (até 14 dias) - CP V ARI	132
Figura 56 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração por secagem - CP V ARI.....	133
Figura 57 - Relação entre a redução da massa dos CPs do ensaio retração por secagem e a relação a/c total - CP V ARI	134

Figura 58 - Retração por secagem até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CPIII.....	136
Figura 59 - Análise da retração por secagem nas idades iniciais (até 14 dias) – CP III	139
Figura 60 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração por secagem - CP III	140
Figura 61 - Relação entre a redução da massa dos CPs do ensaio retração por secagem e a relação a/c total - CP III	141
Figura 62 - Comparação da retração por secagem até 168 dias dos cimentos CP V ARI e CP III	142
Figura 63 - Resultados de resistência à tração na flexão dos traços com cimento CP V ARI.....	146
Figura 64 - Resultados de resistência à compressão dos traços com cimento CP V ARI	150
Figura 65 - Relação entre a fração porosa e a proporção a/c total - CP V.....	155
Figura 66 - Resultados de resistência à tração na flexão dos traços com cimento CP III	158
Figura 67 - Resultados de resistência à compressão dos traços com cimento CP III	161
Figura 68 - Relação entre a fração porosa e a proporção a/c total - CP III	167
Figura 69 - Gráficos provenientes da análise FRX do cimento CP V ARI	182
Figura 70 - Gráficos provenientes da análise FRX do cimento CP III	183

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição química de ACBC de outros estudos (% em massa)	26
Tabela 2 - Sinopse de estudos que avaliaram a utilização de PSA em concretos e argamassas após o ano de 2010	30
Tabela 3 - Composição química dos cimentos CP V ARI e CP III (por FRX) (%)	53
Tabela 4 - Características físicas das areias finas utilizadas na pesquisa	54
Tabela 5 - Composição química da ACBC (por FRX)	54
Tabela 6 - Características físicas dos agregados.....	55
Tabela 7 - Características dos PSA fornecidas pelo fabricante.....	58
Tabela 8 - Traço em massa modificado para o estudo	62
Tabela 9 - Determinação da relação a/c das argamassas com diferentes PSAs	64
Tabela 10 - Composições das argamassas utilizadas (em massa).....	65
Tabela 11 - Sequência de mistura da argamassa	66
Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas com diferentes PSAs	90
Tabela 13 - Microscopias dos traços REF V e ACBC V em três pontos (100x e 1000x)	94
Tabela 14 - Relatório de microscopia óptica dos traços ACBC VA, ACBC VB e ACBC VC em três pontos (100x e 1000x).....	95
Tabela 15 - Microscopias dos traços REF III e ACBC III em três pontos (100x e 1000x)	102
Tabela 16 - Microscopias dos traços ACBC IIIA, ACBC IIIB e ACBC IIIC em três pontos (100x e 1000x)	103
Tabela 17 - Porcentagens de redução das espessuras médias das fissuras do ensaio de retração plástica (CP V ARI vs CP III)	109

Tabela 18 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração autógena - CP V ARI).....	114
Tabela 19 - Teste de Tukey para as médias de retração autógena (CP V ARI).....	115
Tabela 20 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração autógena - CP III)	122
Tabela 21 - Teste de Tukey para as médias de retração autógena (CP III)	123
Tabela 22 - Porcentagens de redução e aumento da retração autógena dos traços com cimento CP V ARI e CP III.....	127
Tabela 23 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração por secagem - CP V ARI).....	130
Tabela 24 - Teste de Tukey para as médias de retração por secagem (CP V ARI)	131
Tabela 25 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração por secagem - CP III)	137
Tabela 26 - Teste de Tukey para as médias de retração por secagem (CP III)	138
Tabela 27 - Porcentagens de redução da retração por secagem dos traços com cimento CP V ARI e CP III.....	143
Tabela 28 - Médias e desvios padrões de resistência à tração na flexão (CP V ARI)	145
Tabela 29 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à tração na flexão - CP V ARI)	147
Tabela 30 - Teste de Tukey para as médias das resistências à flexão (CP V ARI)	148
Tabela 31 - Médias e desvios padrões de resistência à compressão (CP V ARI) ..	149
Tabela 32 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à compressão - CP V ARI)	151
Tabela 33 - Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão (CP V ARI)	152
Tabela 34 - Análise microestrutural por microscopia óptica (1000x) - CP V ARI.....	153

Tabela 35 - Médias e desvios padrões de resistência à tração na flexão (CP III) ...	157
Tabela 36 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à tração na flexão - CP III)	159
Tabela 37 - Teste de Tukey para as médias das resistências à flexão (CP III).....	160
Tabela 38 - Médias e desvios padrões de resistência à compressão (CP III)	161
Tabela 39 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à compressão - CP III)	163
Tabela 40 - Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão (CP III)	164
Tabela 41 - Análise microestrutural por microscopia óptica (1000x) - CP III.....	165

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACBC	-	Areia da cinza de bagaço de cana-de-açúcar
(a/c)	-	Relação água/cimento
(a/c) ad.	-	Relação água/cimento adicional
(a/c) ef.	-	Relação água/cimento efetiva
(a/c) tot.	-	Relação água/cimento total
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BASF	-	<i>Baden Aniline and Soda Factory</i>
CP	-	Corpo de prova
CP III	-	Cimento de Escória de Alto Forno
CP V ARI	-	Cimento de Alta resistência inicial
C-S-H	-	Silicatos de Cálcio Hidratados
FRX	-	Fluorescência de raios X
GESEC	-	Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana
MEV	-	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	-	Norma Brasileira
NM	-	<i>Norma Mercosur</i>
PF	-	Perda ao fogo
pH	-	Potencial de hidrogênio
PSA	-	Polímeros superabsorventes
REF	-	Referência
RILEM	-	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux</i>

- SAP** - *Superabsorbent Polymers*
- SBAS** - *Sugarcane bagasse ash sand*
- T** - Temperatura
- UFSCar** - Universidade Federal de São Carlos
- UR** - Umidade relativa
- UV** - Ultra violeta

Sumário

1. Introdução.....	19
1.1 Justificativa.....	21
1.2 Objetivos	22
1.3 Estrutura da Tese	22
2. Areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar.....	24
3. Polímeros superabsorventes.....	29
3.1 Características químicas e físicas dos PSAs.....	38
3.2 Princípio de ação dos PSAs	39
3.3 Efeito dos PSAs no estado fresco da argamassa e concreto	42
3.4 Controle de alterações de volume pelo PSA.....	45
3.5 Alterações microestruturais pelo PSA	48
4. Programa Experimental.....	51
4.1 Materiais	52
4.1.1 Cimento Portland	52
4.1.2 Agregados miúdos (areia média, areia fina e ACBC).....	53
4.1.3 Superplastificante.....	58
4.1.4 Polímeros superabsorventes.....	58
4.2 Preparação dos corpos de prova.....	61
4.2.1 Traços das argamassas	61
4.2.2 Procedimento de mistura	65
4.3 Testes Preliminares.....	67
4.3.1 Índice de Consistência	67
4.3.2 Tempos de pega	69

4.4 Ensaio de Retração	70
4.4.1 Ensaio de Retração Plástica	70
4.4.2 Ensaio de Retração autógena.....	74
4.4.3 Ensaio de Retração por secagem	82
4.5 Propriedades físico-mecânicas	83
4.5.1 Ensaio de resistência à tração na flexão.....	85
4.5.2 Ensaio de resistência à compressão.....	86
4.5.3 Microscopia óptica das amostras rompidas	87
4.6 Análise estatística	87
5. Resultados e discussão	88
5.1 Capacidade de absorção dos PSAs	88
5.2 Consistências das argamassas no estado fresco	89
5.3 Tempos de pega	91
5.4 Retração plástica	92
5.4.1 Cimento CP V ARI.....	92
5.4.2 Cimento CP III.....	100
5.4.3 Cimento CP V ARI vs cimento CP III.....	108
5.5 Retração autógena	110
5.5.1 Cimento CP V ARI.....	110
5.5.2 Cimento CP III.....	120
5.5.3 Cimento CP V ARI vs cimento CP III.....	126
5.6 Retração por secagem	128
5.6.1 Cimento CP V ARI.....	128
5.6.2 Cimento CP III.....	135
5.6.3 Cimento CP V ARI vs cimento CP III.....	142

5.7 Propriedades mecânicas	144
5.7.1 Resistência à tração na Flexão (CP V ARI)	144
5.7.2 Resistência à Compressão (CP V ARI).....	148
5.7.3 Análise microestrutural (CP V ARI)	153
5.7.4 Resistência à tração na Flexão (CP III).....	157
5.7.5 Resistência à Compressão (CP III)	160
5.7.6 Análise microestrutural (CP III)	164
6. Conclusão.....	169
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	171
Referências Bibliográficas	172
Anexo A.....	182

1. Introdução

O consumo anual de concreto no mundo já ultrapassa 14 bilhões de toneladas (GCCA, 2021). A principal razão por esse material ser o segundo mais consumido no mundo, perdendo apenas para água, pode ser atribuída a suas propriedades mecânicas, durabilidade diante de ambientes agressivos, trabalhabilidade no estado fresco e também por seu custo acessível. No entanto, esse consumo excessivo leva a uma alta exploração dos recursos naturais, como, por exemplo, a areia. Esse recurso natural está cada vez mais escasso e seu consumo para produção de concreto foi estimado entre 25,9 e 29,6 bilhões de toneladas por ano (PEDUZZI, 2014).

Com o intuito de reduzir impactos ambientais e aumentar a sustentabilidade na construção civil, materiais alternativos vêm sendo amplamente investigados. Busca-se então a substituição, em parte, dos recursos naturais dos concretos e argamassas desde que não alterem a sua funcionalidade e não prejudiquem o seu desempenho. Além disso, a busca pela destinação mais eficiente de resíduos agroindustriais tem se intensificado à medida que os locais para disposição desses materiais vêm se tornando escassos ou que a disposição incorreta proporciona efeitos nocivos ao meio ambiente (TORRES DE SANDE *et al.*, 2021). A utilização de resíduos na construção civil também promove benefícios financeiros, pois quanto maior a demanda por materiais convencionais, maior a escassez e, conseqüentemente, maior o custo.

Nesse contexto, agregados alternativos de resíduos agroindustriais, como areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) têm sido utilizados com sucesso em substituição à areia natural (FRANCO DE CARVALHO *et al.*, 2020; KIRTHIKA; SINGH; CHOURASIA, 2020). A ACBC é um resíduo gerado em larga escala pelo setor sucroalcooleiro e que necessita de manejo adequado para destinação final, tornando-se fonte de estudos na construção civil. Este material alternativo já vem sendo estudado nos últimos anos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (ALMEIDA *et al.*, 2015, 2019; HEMKEMEIER *et al.*, 2022; MORETTI *et al.*, 2016, 2018; SALES; LIMA, 2010).

Percebe-se, então, que o uso desse resíduo agroindustrial é promissor, em especial na substituição parcial do agregado miúdo convencional na produção de concretos e argamassas (ALMEIDA *et al.*, 2019; HEMKEMEIER *et al.*, 2022; MORETTI *et al.*, 2016; SALES; LIMA, 2010). Entretanto, devido ao refinamento da microestrutura dos compósitos cimentícios em função do aumento de partículas finas de ACBC, destaca-se a importância em avaliar o comportamento de retração dessas matrizes, uma vez que os processos de retração autógena, plástica e por secagem tendem a ser mais pronunciados em matrizes cimentícias mais densas.

Para solucionar problemas relacionados a essa susceptibilidade de fissuração em concretos e argamassas, diversos pesquisadores sugerem o uso de polímeros superabsorventes (PSA) como agentes de cura (ALMEIDA; KLEMM, 2018; HONG; CHOI, 2017; KANG; HONG; MOON, 2017; MECHTCHERINE *et al.*, 2014, 2021; SCHRÖFL *et al.*, 2022). Eles são polímeros higroscópicos capazes de absorver altas quantidades de água (até 400 vezes a sua própria massa) para formação de hidrogéis. Eles podem ser adicionados durante a mistura dos compósitos cimentícios com a função de capturar parte da água de mistura, podendo esta ser adicional ao traço ou não. Essa rápida absorção faz com que o polímero se expanda, formando um gel que controla a liberação de água conforme a necessidade da mistura. Isso reduz os efeitos do processo de autodessecação nas idades iniciais (CRAEYE; GEIRNAERT; SCHUTTER, 2011; HASHOLT *et al.*, 2012; MECHTCHERINE *et al.*, 2014, 2021; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021).

Os efeitos proporcionados pelos PSAs dependem da forma e tamanho dos polímeros, da densidade, da estrutura química e da concentração iônica da solução de poros dos compósitos cimentícios (MECHTCHERINE *et al.*, 2018; SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012). Assim, os materiais utilizados na composição dos concretos e argamassas são preponderantes na determinação da eficiência dos PSA, sobretudo com a utilização de resíduos agroindustriais como agregado miúdo.

Nesse contexto, o entendimento da utilização de polímeros superabsorventes em compósitos cimentícios ecoeficientes confeccionados com agregados miúdos alternativos (como areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar) ainda não foi

explorado. Por isso, o estudo teve como intuito, contribuir com o avanço do conhecimento sobre:

- efeito da ACBC na susceptibilidade de fissuração por processos de retração de diferentes compósitos cimentícios; e
- eficiência do uso de PSA para redução da retração em compósitos cimentícios ecoeficientes.

1.1 Justificativa

O alto consumo de concreto (14 bilhões de toneladas por ano), juntamente com a escassez de recursos naturais, como a areia, destaca a necessidade de explorar materiais alternativos na indústria da construção civil. A utilização de resíduos agroindustriais, como a areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (ACBC), apresenta uma solução promissora para essa questão, oferecendo benefícios ambientais e financeiros. Apesar disso, devido ao refinamento da microestrutura dos compósitos cimentícios em função do aumento de partículas finas de ACBC destaca-se a importância em avaliar o comportamento de retração dessas matrizes, uma vez que os processos de retração tendem a ser mais pronunciados em matrizes cimentícias mais densas.

E para mitigar problemas de retração em concretos e argamassas, a utilização de polímeros superabsorventes (PSA) como agentes de cura tem sido sugerida por diversos pesquisadores. No entanto, a interação desses polímeros com agregados alternativos, como a ACBC, ainda não foi explorada. Portanto, este estudo se propôs a investigar o potencial dos PSAs em matrizes cimentícias que incorporam ACBC, com o objetivo de avaliar o comportamento diante de efeitos de retração.

Essa justificativa destaca a relevância e a necessidade do estudo proposto, considerando tanto o contexto atual da indústria da construção civil, quanto as lacunas existentes na literatura científica no que diz respeito a atuação de PSA em matrizes cimentícias com agregados alternativos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar a cura interna de compósitos cimentícios ecoeficientes com incorporação de areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) por meio de polímeros superabsorventes (PSA). Para isso, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar a retração plástica, autógena e por secagem de compósitos ecoeficientes produzidos com areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e diferentes tipos de cimento Portland;
- Avaliar a compatibilidade e eficiência de diferentes polímeros superabsorventes na redução da susceptibilidade de fissuração em compósitos cimentícios ecoeficientes;
- Investigar a influência de diferentes polímeros superabsorventes nas propriedades físico-mecânicas de compósitos cimentícios ecoeficientes.

1.3 Estrutura da Tese

A tese foi estruturada em sete capítulos, além das referências bibliográficas e anexos. No primeiro capítulo está apresentada uma breve introdução, buscando apresentar a lacuna do conhecimento que esse estudo propõe a preencher. A importância da busca por materiais alternativos vide a escassez de recursos naturais, com foco no uso de areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar foi destacada. Também foram introduzidos estudos sobre o uso dos polímeros superabsorventes como agentes de cura interna. Esse capítulo também apresenta os principais objetivos do estudo.

No capítulo 2 está apresentada uma revisão da literatura na qual, inicialmente, é realizada uma breve contextualização sobre a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Já no capítulo 3, a utilização de polímeros superabsorventes é detalhada desde a as suas características físicas e químicas, até as alterações microestruturais

promovidas por esse material e seus efeitos nas propriedades do concreto no estado endurecido.

No capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados no programa experimental. Nesse capítulo foram apresentados os traços utilizados na produção dos compósitos cimentícios e todos os ensaios executados. Inicialmente foram realizados testes preliminares a fim de definir todos os materiais e técnicas de investigação a serem utilizadas. Tendo essa primeira etapa concluída, foram realizados ensaios de retração plástica, autógena e por secagem, empregando uso de dois tipos de cimento Portland e três tipos de PSA, os quais compreenderam a segunda etapa da pesquisa. E para complementar os conhecimentos obtidos e avaliar os reflexos da densificação das matrizes cimentícias em estudo, na terceira etapa foram realizados ensaios mecânicos.

No capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões do presente estudo com seções organizadas conforme a apresentação do programa experimental explanado no capítulo 4 em cada uma das etapas.

Enquanto no capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e descobertas obtidas com base nos resultados alcançados, além de sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, foram apresentadas as referências bibliográficas focadas em artigos científicos de alto fator de impacto, e os anexos.

2. Areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar

A areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) é um resíduo agroindustrial gerado em grande escala, a partir da queima do bagaço pelas indústrias sucroalcooleiras. A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas cultivados no Brasil, o qual detinha cerca de 9,9 milhões de hectares plantados em 2021, sendo líder mundial na sua produção (EMBRAPA, 2022). Entre 2000 e 2010 a produção de cana-de-açúcar no Brasil mais do que dobrou, passando de, aproximadamente, 326 para 717 milhões de toneladas, conforme o gráfico da Figura 1.

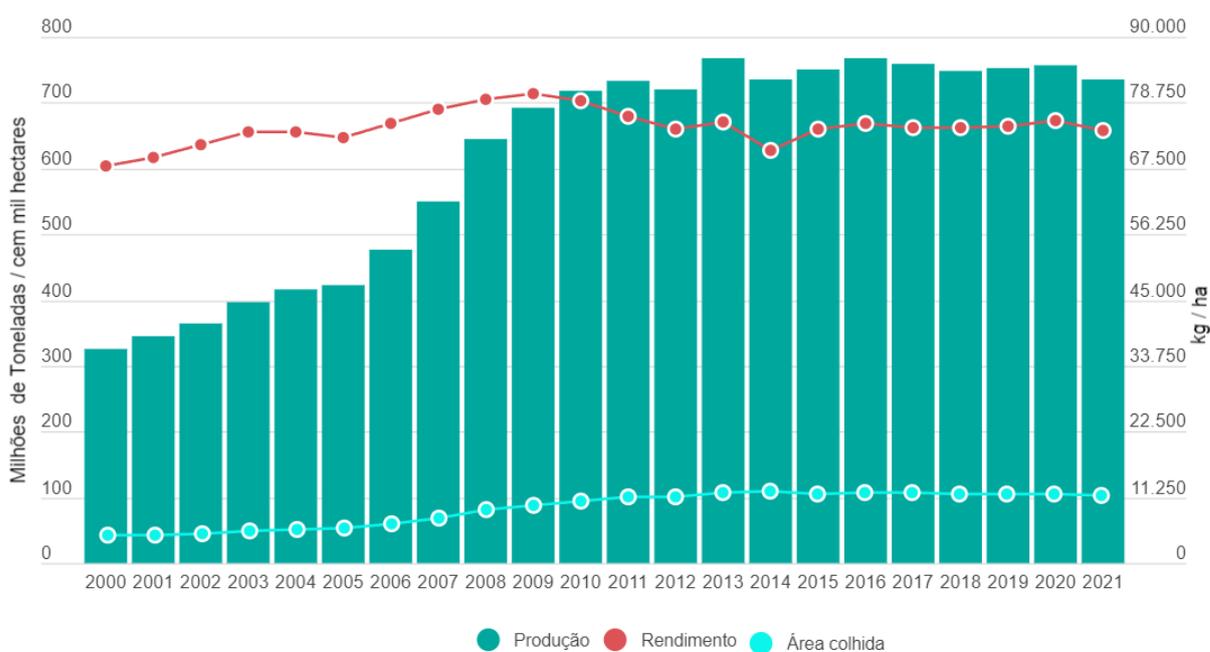


Figura 1 - Produção, rendimento e área colhida de cana-de-açúcar no Brasil entre 2000 e 2021

Fonte: EMBRAPA (2022)

Além disso, embora diversas culturas sejam cultivadas no mundo, apenas quatro delas representaram metade da produção global de culturas primárias em 2018. E a cana-de-açúcar ocupa a posição de liderança, com 21% do total da produção mundial, com 1,9 bilhões de toneladas, conforme o gráfico da Figura 2.

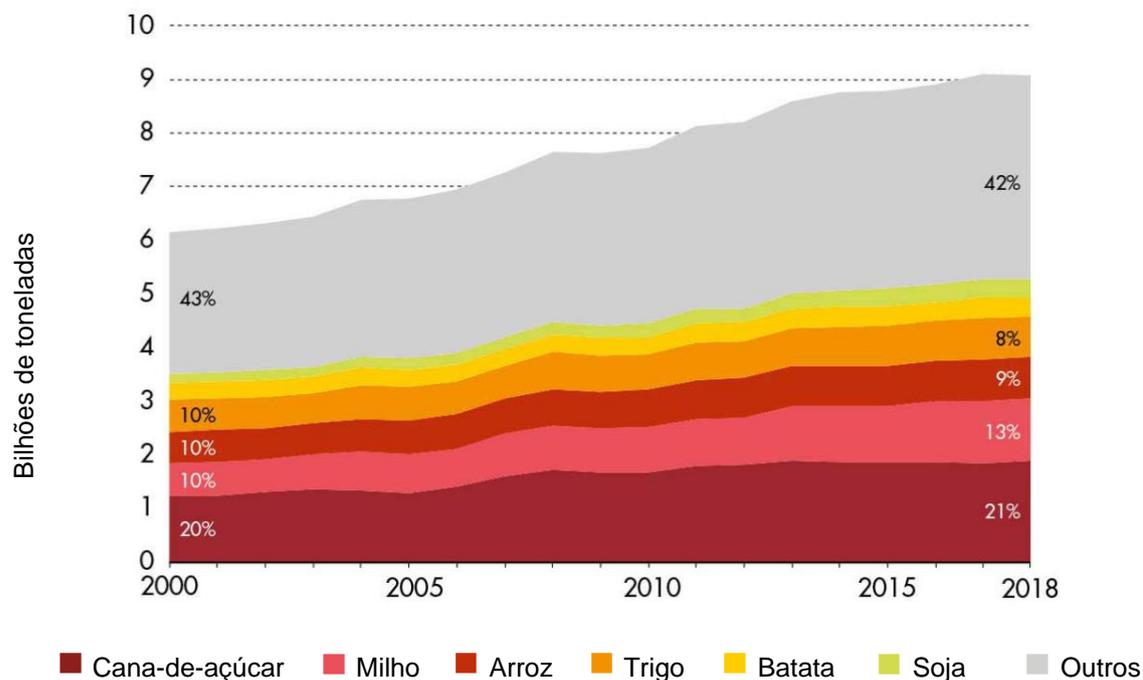


Figura 2 - Produção dos principais produtos agrícolas cultivados no mundo entre 2000 e 2018

Fonte: adaptado de (FAO, 2020)

Os principais produtos provenientes da cana-de-açúcar são o açúcar e o etanol. Porém, esse processo gera outros derivados, como o vinhoto, a levedura e o bagaço da cana. O bagaço produzido durante o processamento da cana é queimado nas caldeiras para gerar energia elétrica nas usinas. O processo de queima desse bagaço gera a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar, que por sua vez, é um dos resíduos que promove problemas para as indústrias quanto a sua destinação final. Levando em consideração a produção de 2013/2014, foram geradas 4 milhões de toneladas de cinza de bagaço de cana-de-açúcar (MORETTI *et al.*, 2016). E para que problemas relacionados à disposição inadequada desse resíduo sejam minimizados, uma das alternativas é utilizá-lo na construção civil. Além de reduzir o descarte inadequado desses resíduos, pode aumentar a resistência e a durabilidade dos compósitos cimentícios (ALMEIDA *et al.*, 2015; HEMKEMEIER *et al.*, 2023; MORETTI *et al.*, 2016, 2018).

A cinza residual é composta principalmente por sílica, um elemento derivado tanto da estrutura vegetal quanto do solo agrícola. Na indústria de açúcar e álcool,

são produzidos dois tipos de cinzas. A cinza volátil, que é originada dos filtros de chaminés, e as cinzas densas, derivadas das caldeiras das usinas. As cinzas voláteis geralmente exibem uma alta perda na combustão e uma reatividade superior, devido à presença significativa de sílica amorfa. Por outro lado, as cinzas densas apresentam uma perda na combustão mais baixa e contêm grandes quantidades de quartzo (sílica cristalina) em sua composição, resultando em uma reatividade mais baixa.

A utilização das cinzas como materiais alternativos na construção civil é conduzida com base em sua composição química e mineralógica. As cinzas que são principalmente amorfas podem ser empregadas como pozolanas em matrizes de cimento, devido à sua elevada reatividade (CHUSILP; JATURAPITAKKUL; KIATTIKOMOL, 2009; DE SOARES *et al.*, 2016). No entanto, são necessários processos de tratamento térmico e moagem para atribuir reatividade a essas cinzas. Por outro lado, as cinzas que são principalmente cristalinas são mais eficazes quando utilizadas como material inerte, por isso, podem ser utilizadas em substituição de parte dos agregados naturais em concretos e argamassas (ALMEIDA *et al.*, 2015). A Tabela 1 apresenta estudos que utilizaram a ACBC com essa finalidade.

Tabela 1 - Composição química de ACBC de outros estudos (% em massa)

Elementos	Autores				
	Sales e Lima (2010)	Cordeiro <i>et al.</i> (2009)	Almeida <i>et al.</i> (2015)	Moretti <i>et al.</i> (2016)	Moretti <i>et al.</i> (2018)
SiO ₂	88,2	78,3	80,8	80,2	91,3
CaO	0,6	2,2	1,6	1,8	0,4
Al ₂ O ₃	2,3	8,6	2,5	2,6	2,3
Fe ₂ O ₃	5,1	3,6	5,8	5,6	3,0
MgO	0,4	1,7	1,5	1,6	0,2
K ₂ O	1,3	3,5	3,9	4,0	0,5
Na ₂ O	0,1	0,1	0,2	0,2	-
SO ₃	<0,1	0,0	0,1	0,1	-
Perda ao fogo	0,4	0,4	0,7	0,8	1,3

Com base nesses dados, nota-se a presença predominante de SiO₂ na ACBC de todos os estudos. Assim, a esse resíduo torna-se promissor na substituição de agregados finos por apresentar baixa atividade pozolânica e alto teor de quartzo em sua composição (ALMEIDA *et al.*, 2015; MORETTI *et al.*, 2016).

Diversos estudos avaliaram a utilização da ACBC em substituição à parte dos agregados miúdos. Essa finalidade auxilia na redução da exploração dos recursos naturais, cada vez mais escassos. A substituição parcial da areia natural do concreto e das argamassas até 50% foi estudada por outros autores, os quais concluíram que 30% da areia natural por ACBC no concreto é um limite ótimo, pois pode resultar em melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade (ALMEIDA *et al.*, 2015; HEMKEMEIER *et al.*, 2022, 2023; MORETTI *et al.*, 2016; SALES; LIMA, 2010). Isto se deve ao refinamento dos poros proporcionado pelo efeito fíler (ALMEIDA *et al.*, 2019; ARIF; CLARK; LAKE, 2017).

No estudo conduzido por Almeida e outros (2015), os pesquisadores examinaram o uso de ACBC como um agregado alternativo e concluíram que a substituição acima de 30% dos agregados por esse resíduo podem resultar em um aumento da carbonatação. Adicionalmente, a ACBC pode diminuir a quantidade de poros nas argamassas devido ao seu tamanho de partícula menor em comparação com o agregado natural. Esse efeito foi justificado pelos pesquisadores como um possível resultado do empacotamento da ACBC na argamassa. E substituindo 30% dos agregados finos por ACBC pode resultar na manutenção das propriedades mecânicas, tamponamento de microporos e aumento da durabilidade da argamassa.

Moretti e outros (2016) também investigaram o uso de ACBC como substituto para agregados naturais na mesma proporção. As propriedades mecânicas do concreto com 30% de ACBC foram semelhantes às do concreto padrão. O aumento da proporção de ACBC resultou em um aumento na quantidade de água na mistura para manter a consistência constante, ou seja, a presença de ACBC resultou em uma maior absorção de água em comparação com o agregado natural utilizado.

Em outro estudo desenvolvido por Moretti e outros (2018) os pesquisadores concluíram que a inclusão de ACBC modificou a distribuição do tamanho dos poros, mas não impactou a porosidade das argamassas. As argamassas fabricadas com

ACBC exibiram um volume reduzido de macroporos. Além disso, essas argamassas também mostraram uma frequência reduzida de poros nas faixas de 60 - 80 μm e 100 - 300 μm . Portanto, ficou claro que a ACBC promove uma densificação das matrizes cimentícias.

Almeida e outros (2019) apontaram que a substituição parcial da areia por ACBC resultou em um aumento tanto na resistência à compressão quanto na resistência à penetração de cloretos no concreto. Eles atribuíram esse resultado ao efeito de compactação da ACBC e de funcionar como um ativador alcalino do cimento Portland. Neste estudo, a resistência à tração e o módulo de elasticidade não foram significativamente impactados pela incorporação de ACBC. A inclusão de ACBC também resultou em uma redução da probabilidade de corrosão, devido ao atraso na despassivação da armadura. Isso foi associado ao aumento da alcalinidade do concreto e à redução da conectividade dos poros promovida pela ACBC.

Hemkemeier e outros (2023) examinaram o uso de ACBC como substituto parcial do agregado natural em argamassas de reparo e observaram que as argamassas com ACBC apresentaram maior resistência à entrada de agentes agressivos. A substituição de 30% da areia natural por ACBC diminuiu os efeitos relacionados à carbonatação e à penetração de cloretos em 30% e 10%, respectivamente, e proporcionou um atraso de 113% no início da corrosão. Esse efeito foi atribuído ao tamponamento dos poros, formando matrizes cimentícias mais densas.

Portanto, é evidente que este subproduto agroindustrial tem um grande potencial, especialmente quando usado como substituto parcial do agregado miúdo convencional na produção de concretos e argamassas. No entanto, em virtude da densificação das matrizes cimentícias pela ACBC, apontada pela maioria dos estudos observados, torna-se importante a investigação da retração plástica, autógena e por secagem dessas argamassas, uma vez que, o aumento de partículas finas pode levar a maior suscetibilidade a fissuras em decorrência da maior tensão capilar.

3. Polímeros superabsorventes

Os polímeros superabsorventes (PSA) são hidrogéis reticulados que podem absorver e reter grandes quantidades de água em relação à sua própria massa. Eles são considerados um novo tipo de aditivo que podem fornecer água adicional para a cura interna de materiais cimentícios durante os processos de cura e endurecimento.

Em contato com água ou soluções aquosas, os PSAs hidratam e formam um gel polimérico (hidrogel). Estes polímeros são capazes de absorver até 1,5 kg de água por grama de PSA (WYRZYKOWSKI *et al.*, 2018). Este líquido é armazenado na estrutura do polímero por um determinado período de tempo antes de ser liberado. A Figura 3 mostra a formação do hidrogel quando a água é colocada em contato com polímero. O escalímetro da imagem foi utilizado como referência e possui 10 cm de comprimento.

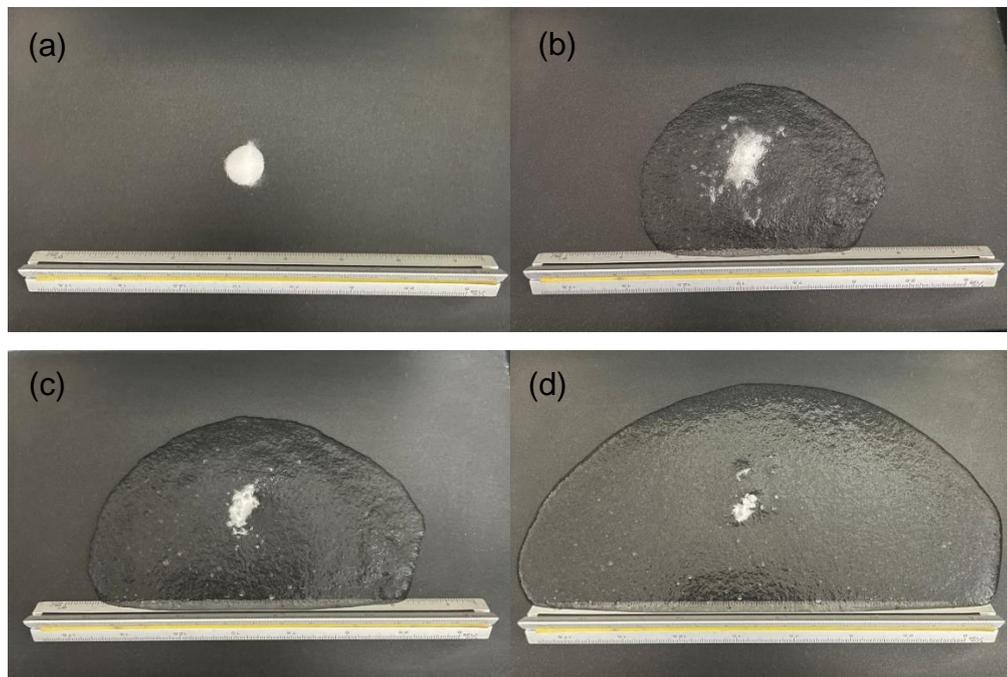


Figura 3 - Formação do hidrogel: (a) amostra de PSA seca; (b), (c) e (d) evolução da absorção e espalhamento da amostra de PSA após contato com água.

A indústria de higiene pessoal descartável ainda é a principal consumidora desses polímeros, representando cerca de 80% da produção total, para o qual esses produtos foram inicialmente desenvolvidos no final da década de 80 (ZOHURIAAN-MEHR *et al.*, 2010). Além da indústria de higiene pessoal descartável, os polímeros superabsorventes (PSA) também têm sido utilizados em diversos outros setores, como agricultura, indústria farmacêutica, embalagens alimentícias, construção civil, situações de gelo e degelo, entre outros (SNOECK *et al.*, 2014; VENKATACHALAM; KALIAPPA, 2023). Os principais produtores desse material são os EUA, Alemanha, China e Japão.

O conceito de PSA como aditivo para materiais cimentícios já vem sendo debatido desde a década de 90. Desde então, muitos estudos têm sido realizados para entender como os polímeros superabsorventes (PSA) interagem com o concreto e as argamassas, e como isso afeta suas propriedades (ALMEIDA; KLEMM, 2018; ESTEVES; JENSEN, 2012; JENSEN; HANSEN, 2001, 2002; KLEMM; ALMEIDA; SIKORA, 2016; MECHTCHERINE *et al.*, 2014, 2021; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021; SCHRÖFL; SNOECK; MECHTCHERINE, 2017; SNOECK *et al.*, 2014; SNOECK; JENSEN; DE BELIE, 2015; ZOHURIAAN-MEHR *et al.*, 2010). A Tabela 2 apresenta alguns estudos realizados após o ano de 2010, os quais avaliaram a utilização de polímeros superabsorventes em concretos e argamassas. Essa tabela contempla o título de cada estudo, com seus respectivos autores, além das principais conclusões.

Tabela 2 - Sinopse de estudos que avaliaram a utilização de PSA em concretos e argamassas após o ano de 2010

Estudo	Referência	Principais conclusões
<i>Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks</i>	Craeye, Geirnaert e Schutter (2011)	- A retração autógena é reduzida com a adição de PSA na proporção de 42%, 54% e 57% seguindo a ordem da capacidade de absorção; - A adição de PSA também leva a uma redução da resistência à compressão de até 28% e à tração na flexão de 33% pelo PSA de maior capacidade de absorção.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<p><i>Incorporation superabsorbent polymer (SAP) particles as controlling pre-existing flaws to improve the performance of engineered cementitious composites (ECC)</i></p>	<p>Yao, Zhu e Yang (2012)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A presença de PSA pode melhorar a capacidade de deformação por tração em até 80%; - Os PSAs reduzem a espessura das fissuras de compósitos cimentícios; - PSAs afetam negativamente a resistência à compressão em até 15%; - A retração plástica e a retração por secagem podem ser reduzidas com PSAs.
<p><i>Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: Results of a RILEM round-robin test</i></p>	<p>Mechtcherine e outros (2014)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Houve redução de até 44% na retração autógena utilizando o PSA; - A aplicação de PSA promove redução nas resistências à flexão e compressão; - A forma e o tamanho das partículas de PSA podem ter influência nos valores de resistência; - Ocorreu perda da trabalhabilidade pelo PSA sem água adicional.
<p><i>Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles</i></p>	<p>Pourjavadi e outros (2013)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - O efeito do PSA em pastas é positivo quanto à resistência à compressão e negativo em relação à resistência à tração flexão (sem a utilização de água adicional); - As principais alterações na microestrutura da pasta devido à presença de PSA são uma morfologia mais densa do gel C-S-H.
<p><i>The influence of superabsorbent polymers on strength and durability properties of blended cement mortars</i></p>	<p>Beushausen, Gillmer e Alexander (2014)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A adição de PSA reduz a resistência à compressão, principalmente com relações a/c elevadas; - Houve aumento na porosidade, no entanto combinada com uma microestrutura melhorada.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<p><i>Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50</i></p>	<p>Snoeck e outros (2014)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - O ensaio de consistência é preponderante para neutralizar a perda de trabalhabilidade à absorção de água de mistura pelos PSAs; - A água adicional precisa ser considerada ao utilizar PSAs para manter a microestrutura; - Ocorreu a densificação da matriz cimentícia contendo PSA e sem água adicional; - A resistência à compressão é afetada quando utilizada água adicional nas misturas, quando alcançada relação a/c de 0,42.
<p><i>The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials</i></p>	<p>Snoeck, Jensen e Belie (2015)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A quantidade de água de mistura absorvida pelo PSA pareceu ser independente da mistura; - Ensaio manuais e descontínuos coincidem com os ensaios contínuos e automatizados para mensurar a retração autógena; - A retração autógena é inferior em misturas com escória de alto forno devido às reações mais lentas dos materiais cimentícios suplementares.
<p><i>Development of mortars containing superabsorbent polymer</i></p>	<p>Senff e outros (2015)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Os resultados de resistência à tração na flexão enfatizaram a importância da correta correlação entre a dosagem de partículas de PSA e a relação a/c para manter invariável o desempenho das amostras, no que diz respeito às amostras sem PSA.
<p><i>Sorption kinetics of superabsorbent polymers (SAPs) in fresh Portland cement-based pastes visualized and quantified by neutron radiography and correlated to the progress of cement hydration</i></p>	<p>Schroefl e outros (2015)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Os PSAs apresentaram alto impacto nas propriedades reológicas em pastas à base de cimento fresco, além de eficiência na mitigação da retração autógena.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<i>Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete</i>	Justs e outros (2015)	- Os principais picos de hidratação no calorímetro isotérmico são menores e aparecem mais cedo com a adição de PSA.
<i>The effects of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by means of sorption experiments</i>	Snoeck e outros (2015)	- A relação a/c efetiva é a mais importante no estudo de PSAs; - A pasta de cimento com PSAs e sem água adicional apresentou diminuição na quantidade de micro e mesoporos; - Pastas de cimento com PSAs e com água adicional apresentaram aumento na faixa maior de mesoporos.
<i>Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete</i>	Laustsen, Hasholt e Jensen (2015)	- A adição de PSA reduz a incrustação de geada salina. A resistência ao gelo ocorre devido a uma combinação de vazios do polímero.
<i>Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age</i>	Shen e outros (2016)	- A retração autógena de misturas com PSA promoveu expansão precoce, influenciada pela quantidade de água; - A taxa de retração autógena do concreto com PSA diminuiu com o aumento da água adicional.
<i>Application of superabsorbent polymers (SAP) in cementitious materials with blended cements</i>	Klemm, Almeida e Sikora (2016)	- A aplicação de PSA pode resolver problemas de autodessecação, fornecendo água de maneira gradual para hidratação dos compósitos cimentícios; - O PSA auxilia na redução da retração autógena em argamassas com escória de alto forno e cinza volante; - As propriedades mecânicas foram influenciadas pelo tipo de PSA e tipo de cimento utilizado.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<i>Effect of internal curing by superabsorbent polymers – Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars</i>	Song, Choi e Choi (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - A incorporação de PSA resultou na redução da retração autógena; - O aumento da quantidade de PSA resultou em maior quantidade de vazios, reduzindo a resistência à compressão.
<i>Influence of superabsorbent polymers on the surrounding cement paste</i>	Wang e outros (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - A dessorção precoce do PSA controlada pela pressão aumenta a porosidade da área afetada. Enquanto a dessorção tardia do PSA reduz a porosidade final.
<i>Effect of superabsorbent polymers (SAP) on the freeze–thaw resistance of concrete: results of a RILEM interlaboratory study</i>	Mechtcherine e outros (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - Houve redução nas propriedades mecânicas quando o PSA foi incluído com água adicional; - O PSA mais fino obteve melhor desempenho na resistência ao congelamento e descongelamento.
<i>Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers</i>	Hong e Choi (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - A proporção de expansão dos PSAs varia conforme o pH e concentração iônica (solução); - Os PSAs são eficazes com relação a auto vedação de fissuras em materiais cimentícios.
<i>Absorption kinetics of superabsorbent polymers (SAP) in various cement-based solutions</i>	Kang, Hong e Moon (2017)	<ul style="list-style-type: none"> - O uso da solução de poros nos métodos de <i>tea-bag</i> pode contribuir para a melhor previsão da absorvência e cinética de absorção de PSA; - O método do saquinho de chá pode ser utilizado de forma eficiente para determinação da quantidade de PSA e água adicional.
<i>Efficiency of internal curing by superabsorbent polymers (SAP) in PC-GGBS mortars</i>	Almeida e Klemm (2018)	<ul style="list-style-type: none"> - O PSA pode reduzir a retração autógena, principalmente com altas quantidades de escória de alto forno; - Quanto maior a capacidade de absorção do PSA, maior a quantidade de poros formados; - Mesmo aumentando a porosidade, os PSAs não afetaram a resistência à compressão, quando utilizados baixos teores de escória.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<p><i>Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test</i></p>	<p>Mechtcherine e outros (2018)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - O método do saquinho de chá e o método de filtração foram avaliados como aplicáveis no contexto do uso de PSA na construção de concreto para avaliação das propriedades de absorção.
<p><i>Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability</i></p>	<p>Chindasiriphan, Yokota e Pimpakan (2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A absorção do PSA pode ser reduzida adicionando Ca^{2+} a mistura; - A adição de PSA reduziu a resistência à compressão em até 28%; - Os PSAs aumentaram as atividades de auto vedação dos traços estudados.
<p><i>The effect of superabsorbent polymers on the mitigation of plastic shrinkage cracking of conventional concrete, results of an inter-laboratory test by RILEM TC 260-RSC</i></p>	<p>Boshoff e outros (2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A adição de PSA ao concreto convencional reduziu a fissuração por retração plástica; - Ocorreu diminuição de 18% na resistência à compressão, quando utilizado água adicional na mistura.
<p><i>The effectiveness of Super Absorbent polymers and superplasticizer in self-healing of cementitious materials</i></p>	<p>Sidiq e outros (2020)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A adição de PSA tem efeitos positivos nas propriedades reológicas das misturas; - A adição de superplastificante na matriz cimentícia impacta na absorção de água dos PSAs; - Os PSAs promoveram efeitos de auto cicatrização e selagem mais eficientes às matrizes cimentícias.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<p><i>Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction - update of RILEM state-of-the-art report</i></p>	<p>Mechtcherine e outros (2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - O efeito da adição de PSA nas propriedades reológicas de materiais frescos à base de cimento depende das propriedades de absorção e dessorção do PSA utilizado; - A perda de trabalhabilidade pode ser compensada aumentando a quantidade total de água e/ou utilizando um superplastificante.
<p><i>Reduction of shrinkage by Superabsorbent polymers (SAP) in fibre reinforced mortars</i></p>	<p>Rostami, Klemm e Almeida (2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A maior redução na propagação das fissuras decorrentes da retração plástica foi com PSAs finos; - O comportamento geral das argamassas PSA com diferentes ligantes é quase idêntico; - A eficácia do PSA depende do tamanho das partículas.
<p><i>Effect of Superabsorbent Polymer on the Mechanical Performance and Microstructure of Concrete</i></p>	<p>Zheng, Han e Liu (2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e resistência à tração por fissuração são inversamente proporcionais à quantidade de PSA adicionados à mistura; - A estabilidade volumétrica foi melhorada em decorrência da menor retração autógena (30% de redução) obtidas com uso do PSA; - Ocorreu a oclusão de poros das matrizes cimentícias após a atuação dos PSA, reduzindo efeitos de congelamento em até 28%.
<p><i>Recent progress in superabsorbent polymers for concrete</i></p>	<p>Schröfl e outros (2022)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A retração plástica e sua propensão à fissuração são eficientemente mitigadas pelos PSAs.

Estudo	Referência	Principais conclusões
<p><i>The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete</i></p>	<p>De Meyst e outros (2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - A alteração do tamanho das partículas e do tipo de cimento não influenciou na capacidade de atuação dos PSAs; - Houve redução na resistência à compressão de até 22% com a presença de PSA nas misturas devido à formação de macroporos nas matrizes; - Houve atraso no tempo de pega dos traços com PSA; - Quanto maior a quantidade de PSA, maior a redução da retração autógena (de até 89%) por conta da maior quantidade de água disponível para cura.

Tendo em vista esses estudos e seus principais resultados apontados, notou-se a falta de pesquisas explorando a utilização de polímeros superabsorventes em compósitos cimentícios contendo agregados alternativos. E como esses tipos de agregados estão sendo cada vez mais buscados para minimizar os problemas de escassez de recursos naturais, é de suma importância, analisar o comportamento dos mesmos em conjunto com polímeros superabsorventes.

E baseado na alta exploração da utilização de polímeros superabsorventes na construção civil, dois Comitês Técnicos RILEM foram formados com o intuito de coordenar e compilar resultados de pesquisas sobre PSA: TC 225-SAP (*Application of Superabsorbent Polymers in Concrete Construction*) e TC 260-RSC (*Recommendations for Use of Superabsorbent Polymers in Concrete Construction*). O objetivo dos TC's foi desenvolver recomendações práticas para pesquisadores e profissionais que almejam estudar o uso do PSA em concreto.

3.1 Características químicas e físicas dos PSAs

Os primeiros PSAs eram feitos de amido, celulose quimicamente modificados, álcool polivinílico e óxido de polietileno. Atualmente, eles são geralmente fabricados a base de poliacrilamida e ácido poliacrílico (Figura 4). Quando em contato com a água, a estrutura tridimensional permite a formação de um hidrogel (MECHTCHERINE et al., 2021).

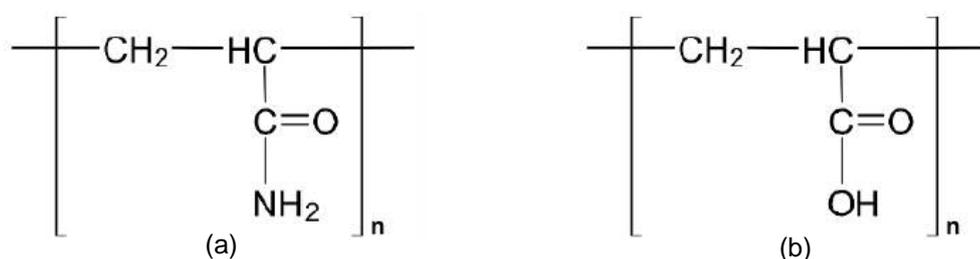


Figura 4 - Base dos PSAs: (a) poliacrilamida e (b) ácido poliacrílico

O desempenho do PSA pode variar em diferentes meios aquosos e, por isso, o uso de poliacrilamida para preparação de PSAs possui vantagens. Uma delas é a possibilidade de polimerização da acrilamida com diferentes quantidades de ácido acrílico. Essa capacidade favorece o controle da taxa de inchaço dos PSAs em pH elevado, variando a concentração de ácido na composição polimérica. E outra vantagem é que a acrilamida contém hidrogênio que pode ser desprotonado em ambientes com pH elevado. Esse processo facilita a resposta das cadeias poliméricas à mudança de alcalinidade da solução (efeito usual em misturas cimentícias) (MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012).

Apesar dessas vantagens, a produção de PSA geralmente é focada em polímeros à base de ácido acrílico, principalmente para a indústria sanitária (SCHROEFL *et al.*, 2015). Esses PSAs são otimizados para absorção e armazenamento seguros de fluidos corporais. Apesar disso, a aplicação desses polímeros (e suas modificações) em materiais de construção ainda é limitada devido

à falta de conhecimento sobre seus efeitos em diferentes tipos de concreto, principalmente na presença de agregados alternativos, como a ACBC.

Além disso, a forma e o tamanho dos PSA são definidos pelo seu meio de produção, a qual pode ser, principalmente, por meio de polimerização em suspensão inversa ou polimerização em gel (MECHTCHERINE *et al.*, 2021). A polimerização em suspensão inversa requer maior grau de controle de produção durante a etapa de polimerização, tendo a produção de volumes maiores limitada devido aos custos elevados. Neste processo, a solução aquosa de monômero é suspensa num solvente orgânico e após a polimerização, o produto é filtrado e seco. As partículas de polímero são criadas no reator e não mecanicamente nos estágios após as reações, tendo o produto final partículas de formato esférico. Em contrapartida, a polimerização em gel é o método mais popular na produção de polímeros superabsorventes. Ele é constituído de uma mistura de uma solução aquosa de monômero, agentes de reticulação e produtos químicos iniciadores de UV, os quais são colocados no reator. A radiação UV do reator impulsiona as reações de polimerização, resultando em um gel duro, o qual é triturado e depois seco. As partículas secas são moídas até o tamanho desejado, gerando formatos irregulares.

A capacidade dos polímeros superabsorventes (PSA) de absorver e dessorver em diferentes ambientes é fortemente influenciada pela base do polímero, a química da reticulação e o método de polimerização. Dessa forma, o comportamento do PSA e, conseqüentemente, o desempenho dos materiais cimentícios são determinados pelo tipo de polímero em combinação com a solução aquosa utilizada.

3.2 Princípio de ação dos PSAs

A principal característica das partículas de PSAs é sua capacidade de absorver soluções aquosas em múltiplas quantidades em relação ao seu peso seco individual (SCHROEFL *et al.*, 2015). Inicialmente as moléculas de água se difundem no espaço vazio dentro da rede polimérica e hidratam as cadeias, assim que a estrutura tridimensional seca do PSA entra em contato com a solução. A reticulação dos PSAs impede uma tendência primária que as cadeias poliméricas têm para se endireitarem.

Assim, à medida que a água se move para a rede mantida por ligações de hidrogênio, as partículas de PSA expandem-se, mantendo sua forma de partícula. Conforme a representação esquemática da Figura 5, a hidratação dos PSA é um processo reversível, e a remoção da água resulta no colapso do polímero.

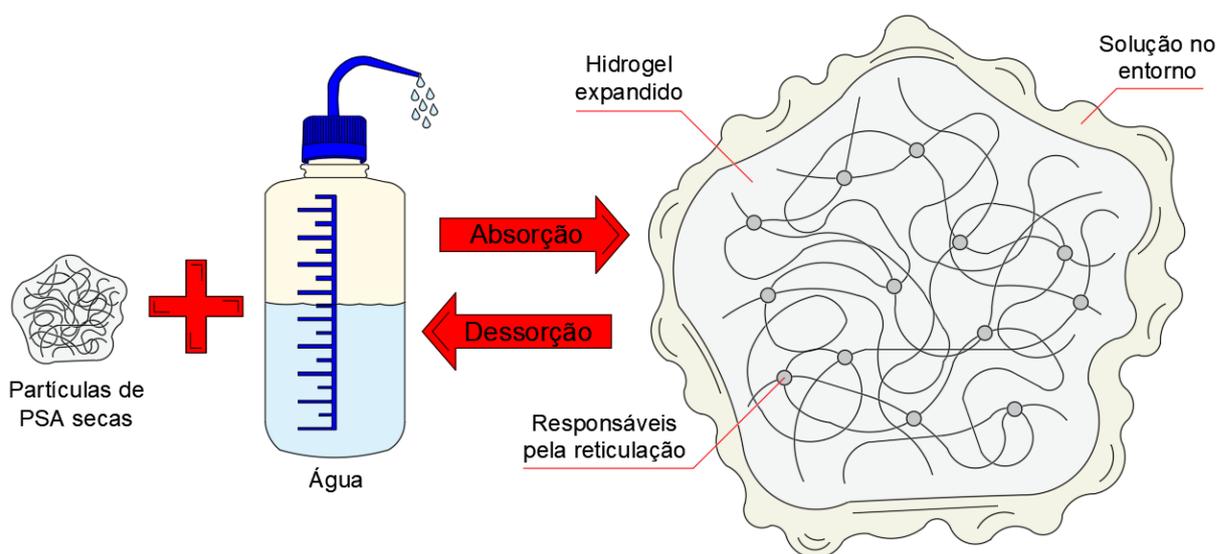


Figura 5 - Representação esquemática do comportamento do PSA após contato com a água

A cinética de absorção, a capacidade de absorção e a estabilidade do hidrogel são influenciadas pela composição molecular, classificação do PSA e a concentração iônica da fase líquida (MECHTCHERINE *et al.*, 2014; SCHROEFL *et al.*, 2015). Além disso, a propriedade hidrofílica dos PSA estabelece ligações intensas com as moléculas de água em suas cadeias poliméricas.

A concentração da solução presente nos poros do cimento, a qual é determinada pela presença de íons de cálcio (Ca^{2+}), exerce influência sobre o comportamento de absorção e dessorção dos PSAs (SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012). Esta solução é altamente alcalina, geralmente com pH superior a 12, e contém Ca^{2+} em seu nível de saturação obtido a partir de etringita, portlandita e CaSO_4 . E ainda pode ter seu pH aumentando pela presença de íons de potássio (K^+) e sódio (Na^+). Com isso, complexos estáveis podem ser formados por conta da

capacidade desses íons em se ligar aos grupos carboxílicos presentes nas cadeias do PSA (MECHTCHERINE; SECRIERU; SCHRÖFL, 2015).

Os PSAs exercem comportamentos distintos quando entram em contato com diferentes soluções (ESTEVES; JENSEN, 2012). Em água desmineralizada, as partículas secas de PSA alcançam um diâmetro maior se comparadas as mesmas partículas introduzidas em solução de poros de cimento. Esse efeito está atrelado à diferente capacidade de absorção dos PSA, conforme o tipo de solução na qual os PSAs são introduzidos (ESTEVES; JENSEN, 2012). No concreto, por exemplo, a capacidade de absorção do PSA é aproximadamente metade da capacidade de absorção na solução de poros simulados (MECHTCHERINE *et al.*, 2021). Isso se deve à presença de partículas sólidas e às diferentes concentrações de íons que limitam a expansão dos PSAs.

A cinética de absorção e subsequente liberação do polímero superabsorvente (PSA) é influenciada pela composição iônica e concentração em um líquido, especificamente a presença de hidróxido de potássio (KOH), sulfato de sódio (Na_2SO_4) e íons de cálcio (Ca^{2+}) em uma solução alcalina (SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012). Além disso, Schröfl, Mechtcherine e Gorges (2012) demonstraram que a presença de Ca^{2+} no fluido aquoso reduz significativamente a capacidade de absorção e modifica a cinética de absorção e dessorção das partículas de PSA.

A morfologia e o tamanho das partículas também exercem influência sobre a cinética e a capacidade de absorção dos polímeros superabsorventes (PSAs) (ESTEVES, 2011; MECHTCHERINE *et al.*, 2018, 2021; MECHTCHERINE; SECRIERU; SCHRÖFL, 2015). Com relação ao formato, partículas esféricas geralmente possuem um grande volume de espaços vazios intercalados, resultando em uma absorção mais rápida de fluidos, quando comparado aos PSAs de formatos irregulares (KANG; HONG; MOON, 2017). E considerando o tamanho de partículas, as de menor dimensão aceleram o processo de absorção, uma vez que uma maior superfície de contato do PSA com o fluido resulta em uma ingestão de água mais acelerada. Por outro lado, essas partículas tem sua capacidade de absorção reduzida

devido a quantidade de água que consegue penetrar na estrutura reticulada ser menor.

Portanto, a capacidade de expansão e a cinética de sorção do PSA podem ser influenciadas pelo grau de reticulação, pH e concentração iônica da solução aquosa, e pela morfologia e tamanho das partículas. Esses aspectos exercem uma influência significativa sobre os efeitos exercidos pelo PSA nas propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas e concretos.

3.3 Efeito dos PSAs no estado fresco da argamassa e concreto

A gestão de água ao longo do tempo é um dos pilares no que diz respeito a tecnologia das argamassas e concretos. Uma quantidade específica de água é necessária para promover a hidratação do cimento e alcançar as propriedades reológicas requeridas para operações em estágios iniciais. No entanto, o aumento da quantidade de água livre pode promover a segregação e perda da água de amassamento do concreto fresco. Essa situação também promove o aumento da porosidade do concreto endurecido e, conseqüentemente, na diminuição do desempenho mecânico, da durabilidade e resistência à penetração de agentes externos. Além disso, a ausência de água suficiente pode acarretar na perda de trabalhabilidade e aumento da autodessecação. Isso leva à retração precoce e, conseqüentemente, ao aumento da susceptibilidade à formação de fissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nesse contexto, a introdução do polímero superabsorvente (PSA) como um novo componente em compósitos cimentícios amplia o leque de possibilidades no que se refere ao controle da água. Os PSAs têm a capacidade de absorver água no estado fresco e liberá-la durante os estágios de pega e endurecimento. Uma absorção e dessorção de água adequadamente controladas podem ser alcançadas por meio da utilização de PSAs, adaptados para atender a necessidades práticas específicas (cura interna, desempenho ante o congelamento e descongelamento, auto vedação, entre outros) (MECHTCHERINE *et al.*, 2021).

Em virtude da capacidade do polímero superabsorvente (PSA) de absorver quantidades expressivas de água, as propriedades reológicas do concreto fresco que contém PSA podem sofrer alterações intensas. Diversos testes empíricos (por exemplo, índice de consistência) podem ser conduzidos com o objetivo de determinar as propriedades associadas aos parâmetros reológicos (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A adição de polímero superabsorventes (PSA), resulta em uma diminuição de considerável na relação a/c livre das misturas (JENSEN; HANSEN, 2002). Com isso, na ausência de fornecimento de água adicional em misturas com PSA, tanto a trabalhabilidade quanto a relação a/c efetiva são reduzidas. E por conta dessa redução, quanto maior a quantidade de PSA, menores os valores de espalhamento das misturas, considerando o ensaio de índice de consistência, resultando em argamassas e concretos mais secos (MECHTCHERINE; SECRIERU; SCHRÖFL, 2015).

Dessa forma, a medição do espalhamento pode ser caracterizada como um método auxiliar para determinar a capacidade de expansão dos polímeros superabsorventes (PSAs) em compósitos cimentícios. Com ela, é possível obter informações sobre a quantidade necessária de água adicional, neutralizando a influência do PSA na trabalhabilidade das misturas. Essa quantidade de água adicional depende da elasticidade do polímero, da pressão osmótica na mistura e da afinidade do polímero pela água de mistura (LEE; WONG; BUENFELD, 2010; MIGNON *et al.*, 2017).

Além disso, para a mesma quantidade de água destinada à cura interna, partículas maiores de PSA conduzem a uma absorção de água mais lenta, levando a misturas menos consistentes durante os primeiros minutos (MECHTCHERINE; SECRIERU; SCHRÖFL, 2015; SNOECK *et al.*, 2014). No entanto, partículas mais finas de PSA promovem valores mais elevados de tensão de escoamento e viscosidade plástica, resultando em misturas mais secas. Isso se deve à maior superfície total de absorção dessas partículas e, conseqüentemente, à obtenção mais rápida do equilíbrio.

Geralmente as pesquisas envolvendo a utilização de PSAs estabelecem três tipos distintos de relação água/cimento para misturas de argamassas e concretos

(MECHTCHERINE *et al.*, 2021). Uma delas é a relação água/cimento total, (a/c) tot., que consiste na relação entre a água e o aglomerante, considerando a quantidade total de água no sistema (incluindo a água extra devido à absorção de PSA). Em segundo lugar, a relação água/cimento adicional, (a/c) ad., a qual representa a relação entre a água e o aglomerante, considerando a quantidade de água adicional que é absorvida e armazenada pelo PSA (água extra). E por fim, a relação efetiva entre água e cimento, (a/c) ef., esta que, por sua vez, é a diferença entre (a/c) tot. e (a/c) ad.. Sendo assim, é a água livre disponível para hidratação do cimento. Para exemplificar: um traço com relação (a/c) tot. = 0,45 e (a/c) ad. = 0,05 possui, conseqüentemente, 0,40 de (a/c) ef.. Ou seja, a relação de 0,05 está destinada à absorção do PSA presente na mistura e atuação como agente de cura interna, enquanto 0,40 é a água livre disponível para as reações de hidratação do cimento.

Essa maneira de separar as quantidades de água das misturas é utilizada para compensar o efeito do polímero superabsorvente (PSA) na trabalhabilidade das argamassas e concretos no estado fresco com a adição de água extra além da quantidade de água livre destinada às reações (GONÇALVES *et al.*, 2014; SENFF *et al.*, 2015; YAO; ZHU; YANG, 2012). O uso de superplastificante também é uma alternativa para controlar o teor de água e a perda de fluidez em argamassas/concretos com PSA (MECHTCHERINE *et al.*, 2014).

O tipo de matéria-prima empregada na composição da mistura pode exercer influência sobre as propriedades reológicas. A utilização de materiais mais finos no concreto, como a areia proveniente da cinza do bagaço de cana-de-açúcar, pode resultar em uma “competição” entre a absorção do PSA e a adsorção de água em partículas mais finas do que a areia natural. Assim, torna-se mais desafiador para o PSA absorver água, acarretando em uma redução da trabalhabilidade (MECHTCHERINE *et al.*, 2014; MECHTCHERINE; SECRIERU; SCHRÖFL, 2015). Diferenças no tipo de cimento, como CP V ARI e CP III, e a utilização de outros aditivos, como um superplastificante, também conduzem a alterações no desempenho do PSA, devido à modificação da concentração iônica do sistema cimentício (ALMEIDA; KLEMM, 2018; LOTHENBACH, 2010; VOLLPRACHT *et al.*, 2016).

Portanto, a inclusão do polímero superabsorvente (PSA) exerce um impacto significativo nas propriedades do concreto/argamassa. Se nenhuma água adicional for fornecida para compensar a absorção do PSA, observa-se um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade plástica do sistema cimentício, levando a misturas mais secas. Nesse contexto, quando métodos empíricos são empregados, espera-se uma diminuição no espalhamento das misturas com PSA e sem água adicional. Assim, a água adicional e o uso de outros aditivos para concreto podem controlar esse efeito. No entanto, isso pode resultar em algumas alterações no desempenho de sorção dos PSA. A capacidade total de expansão do PSA e a disponibilidade de água extra no estado fresco influenciam a hidratação do cimento e as propriedades do concreto endurecido. Por isso, torna-se importante a análise das alterações de volume promovidas pela presença de PSA.

3.4 Controle de alterações de volume pelo PSA

O objetivo principal da implementação PSAs em argamassas e concretos é atenuar a retração autógena (MECHTCHERINE *et al.*, 2021; MIGNON *et al.*, 2017; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021; SCHRÖFL *et al.*, 2022; SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012; SHEN *et al.*, 2016). Esse fenômeno é um dos principais efeitos dos processos de autodessecação e é considerado a deformação da pasta de cimento em um sistema fechado. Trata-se da redução macroscópica do volume dos materiais cimentícios quando o cimento passa pelo processo de hidratação após o tempo de pega final. Isso implica na suscetibilidade do concreto à formação de fissuras e, conseqüentemente, à perda de resistência e durabilidade.

Contudo, esse processo não engloba alterações de volume decorrentes de fatores externos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O que provoca as tensões decorrentes da retração autógena é a presença de superfície que quebra a simetria molecular existente no interior do material. Essa interrupção das moléculas gera uma pressão superficial, proveniente da diferença de pressões entre a água capilar e o vapor/ar no interior do meio poroso (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Conforme a água é consumida durante a hidratação, a pressão do líquido decresce e, simultaneamente, a pressão do vapor se eleva, resultando em um aumento contínuo na pressão superficial entre ambas as fases. Isso indica que o processo de autodessecação gera forças que unem as paredes capilares e culmina na retração do material, favorecendo a formação de fissuras. Essa retração é denominada autógena, no entanto, comportamentos semelhantes também podem ser observados nas retrações por secagem e plástica. Todavia, nestes casos, a água também é perdida para o ambiente e pode ser agravada pelas condições no entorno das argamassas e concretos (GHOURECHIAN *et al.*, 2018; RAJABIPOUR; SANT; WEISS, 2008; ZHUTOVSKY; KOVLER, 2017). A quantidade de microfissuras é dependente de diversos parâmetros, como a relação água/cimento, o tipo de cimento, as condições de cura, umidade, temperatura, velocidade do vento, o tamanho e a classificação dos agregados, a presença de agregados alternativos, entre outros.

Cada tipo de retração ocorre de uma forma e a diferença entre elas se deve principalmente aos mecanismos que influenciam a sua ocorrência. Diferente da retração autógena, a retração plástica ocorre pela perda de água por evaporação quando a argamassa/concreto ainda está no estado fresco, ou seja, antes do final da pega (LEEMANN; NYGAARD; LURA, 2014). Após a mistura do concreto, a água começa a evaporar da superfície do concreto, principalmente quando exposto a altas temperaturas, com umidade baixa e ventos em seu entorno (SADIQUL ISLAM; GUPTA, 2016). E à medida que a água evapora, o volume da matriz cimentícia diminui, caracterizando-se a retração plástica. Esse fenômeno pode desencadear tensões internas no material e caso excedam a resistência à tração do compósito cimentício, pode haver o aparecimento de fissuras (BOSHOF *et al.*, 2020; SIRAJUDDIN; GETTU, 2018). A retração plástica pode ser minimizada realizando um controle do processo de cura do mesmo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Isso geralmente envolve manter a superfície do concreto úmida durante as primeiras horas após a colocação. Além disso, a escolha adequada dos materiais e a relação a/c podem ajudar a reduzi-la.

Por outro lado, a principal diferença entre a retração plástica e a retração por secagem é o momento em que cada uma delas ocorre e, conseqüentemente, os fatores que influenciam (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A retração por secagem ocorre

quando a água contida nos poros do concreto evapora, após o endurecimento do concreto, também resultando em uma diminuição do volume total do concreto (NETO; CINCOTTO; REPETTE, 2010). Após o concreto endurecer, inicia-se a evaporação da água que não está envolvida na reação de hidratação do cimento, principalmente em ambientes secos (MELO NETO; CINCOTTO; REPETTE, 2008). Com essa evaporação, o volume dos poros no compósito cimentício diminui, tendo como consequência, a redução no volume total do material. Essa redução pode levar ao desenvolvimento de tensões internas que, caso excedam a resistência à tração do concreto, podem ocasionar fissuras. A retração por secagem é influenciada por vários fatores, tais como a relação a/c, a dimensão máxima do agregado, a umidade do entorno e o tamanho do elemento de argamassa/concreto (GUO et al., 2014). E para minimizá-la, o uso de baixa relação a/c e agregados com baixa tendência à retração, além da cura adequada da argamassa/concreto é importante .

O aumento do nível de umidade interna do concreto promovido pela presença da água adicional do PSA tem como consequência, a diminuição da pressão superficial entre a água capilar e o vapor, levando a uma redução limitada dos diâmetros capilares. Assim, o concreto com PSA é menos suscetível aos efeitos da autodessecação (JUSTS *et al.*, 2015; SONG; CHOI; CHOI, 2016; WANG *et al.*, 2016).

A cinética de absorção e dessorção dos PSAs é um fator crítico na atenuação da retração autógena. Uma liberação de água mais gradual favorece uma cura interna mais eficaz. Por isso, PSAs com baixa concentração de ânions, sem liberação, ou apenas com uma liberação moderada da solução de poros, podem ser empregados para diminuir a retração autógena por extensos períodos de tempo (MECHTCHERINE *et al.*, 2021; SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012). No entanto, os PSAs com alta anionicidade induzem uma liberação intensa da solução absorvida nos poros nas primeiras horas. E assim que essa água para a cura interna é consumida (de maneira precoce), o efeito que leva a diminuição da retração autógena deixa de ocorrer e esse fenômeno passa a seguir a mesma taxa de retração que no concreto sem PSA.

Os PSAs podem apresentar uma taxa de absorção de água mais lenta, que se estende além do período de endurecimento devido à liberação de água. Nesse

cenário, é possível que uma expansão aconteça para equilibrar uma retração prevista, dependendo da química do cimento e da dosagem do aditivo. O PSA eleva o nível de supersaturação de portlandita na solução, o que pode resultar em tensões de cristalização elevadas e provocar uma expansão do material (SANT *et al.*, 2011; SCHRÖFL *et al.*, 2022; SNOECK; JENSEN; DE BELIE, 2015).

Além disso, o PSA pode ser vantajoso para a auto vedação e auto cicatrização de fissuras em concreto endurecido (CRAEYE; GEIRNAERT; SCHUTTER, 2011; HONG; CHOI, 2017; LEE; WONG; BUENFELD, 2010; SCHRÖFL *et al.*, 2022). Isso se deve à estimulação de hidratação adicional e cristalização do carbonato de cálcio devido a afinidade do PSA com água e penetração nas fissuras. Esse processo pode resultar em um aumento da durabilidade das argamassas e concretos por conta do bloqueio substancial de microfissuras.

3.5 Alterações microestruturais pelo PSA

A incorporação de PSAs em compósitos cimentícios pode modificar de maneira significativa a microestrutura do concreto e suas propriedades, em decorrência da formação de macroporos (LAUSTSEN; HASHOLT; JENSEN, 2015). Quando o PSA absorve água da mistura, ele se transforma em gel e se expande. Este gel é, portanto, responsável pelo armazenamento e liberação de água para a cura interna, conforme a necessidade das reações de hidratação do cimento. Ou seja, essa dessorção de água ocorre simultaneamente ao processo de endurecimento, resultando em uma modificação substancial da microestrutura formada pelos produtos hidratados. Tais alterações podem estar associadas aos vazios criados pelo colapso dos PSAs, conforme esquema da Figura 6.

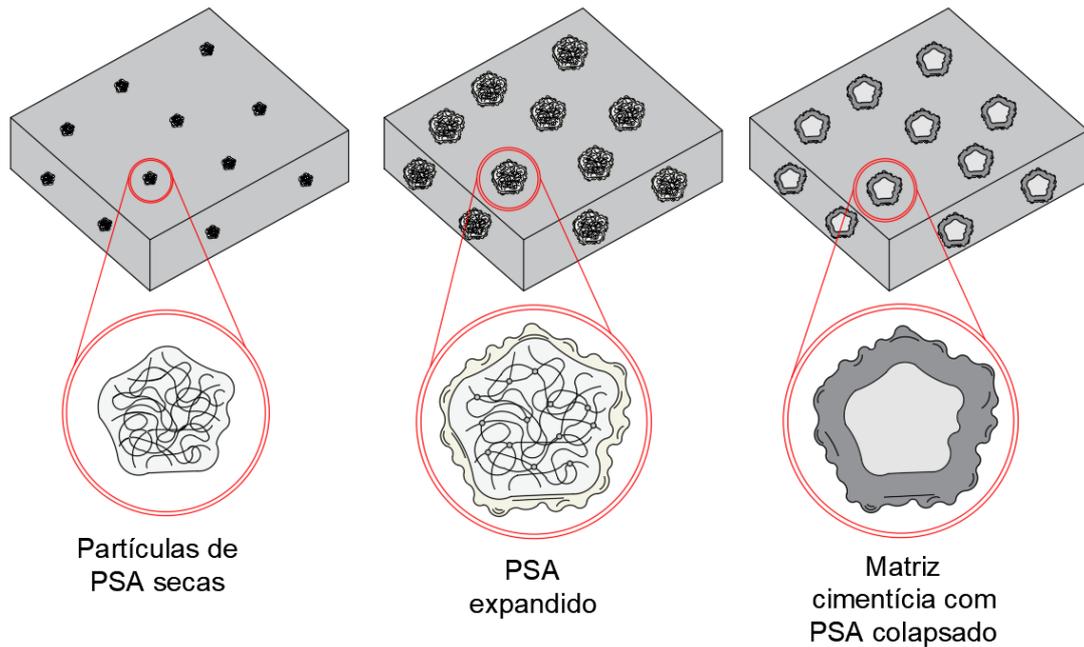


Figura 6 - Representação esquemática dos vazios criados pelo colapso dos PSAs

Os PSAs aumentam a porosidade total devido à formação de macroporos, especialmente quando utiliza-se a água adicional (MECHTCHERINE *et al.*, 2021; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021; WYRZYKOWSKI *et al.*, 2018). As modificações microestruturais provocadas pelo PSA com água adicional alteram as propriedades mecânicas. Quanto maior a quantidade de água na mistura, mais porosa será a microestrutura final e menores serão as resistências à compressão e à flexão. A capacidade de inchaço dos PSAs leva a formação de macroporos nas matrizes cimentícias, os quais também podem afetar a resistência mecânica (BEUSHAUSEN; GILLMER; ALEXANDER, 2014; MECHTCHERINE *et al.*, 2017). No entanto, essa resistência pode ser parcialmente recuperada ao longo do tempo devido à hidratação contínua, facilitada pelos mecanismos internos de cura.

Após o colapso dos PSAs, produtos das reações de hidratação do cimento passam a ocupar os vazios deixados, o que leva ao fechamento de poros e recuperação parcial da resistência à compressão (BEUSHAUSEN; GILLMER; ALEXANDER, 2014; HASHOLT *et al.*, 2012). Essa recuperação depende do fornecimento de água pelo PSA durante a hidratação do cimento. A liberação precoce de água antes do tempo de pega final (comum em PSAs com alta anionicidade) resulta

na redução das propriedades mecânicas, por conta do aumento na relação (a/c) ef.. No entanto, em misturas com PSAs que apresentam uma liberação tardia e mais lenta de água, pode não ocorrer uma diminuição significativa na resistência à compressão (MECHTCHERINE *et al.*, 2021; SCHRÖFL *et al.*, 2022).

Ademais, na ausência de fornecimento de água adicional, o concreto/argamassa com PSA pode apresentar resistência similar à de concretos/argamassas convencionais. Nessa situação, a cura interna proporcionada pelo PSA pode aumentar a densidade da pasta de cimento e neutralizar o efeito do aumento na porosidade total (HASHOLT *et al.*, 2012; MIGNON *et al.*, 2017). No entanto, o não uso de água adicional pode acarretar em outros problemas já mencionados, como a perda de trabalhabilidade da argamassa ou concreto.

De maneira geral, o polímero superabsorvente é um aditivo com grande potencial para materiais à base de cimento. Sua eficácia como agente de cura interna resulta em uma redução da retração autógena e, conseqüentemente, menor propensão à formação de fissuras. Em contrapartida, o PSA aumenta a porosidade do concreto no estado endurecido, o que pode levar a diminuição das propriedades mecânicas. No entanto, os poros formados por PSAs colapsados podem ser parcialmente preenchidos com produtos hidratados. Portanto, a aplicação de PSAs em diferentes matrizes cimentícias deve ser cuidadosamente avaliada.

Assim, analisando os efeitos da utilização de PSA em matrizes cimentícias e visando estudar esses materiais incorporados a matrizes ecoeficientes, este estudo dirigiu-se, portanto, à exploração do comportamento de três tipos de PSAs em matrizes cimentícias com ACBC, tendo como base, dois tipos de cimentos Portland (CP V ARI e CP III).

4. Programa Experimental

Neste capítulo estão apresentados os materiais e suas características físico-químicas, além dos métodos para definição dos traços, preparação das amostras, e avaliação dos compósitos cimentícios.

O estudo avaliou o efeito de três PSAs (com diferentes capacidades de absorção) em compósitos cimentícios produzidos com 30% de ACBC (em relação à massa da areia fina) e dois tipos de cimento Portland (CP V ARI e CP III). Esse teor de ACBC já vem sendo utilizado pelo Grupo de Estudos em Sustentabilidade e Ecoeficiência em Construção Civil e Urbana – GESEC da UFSCar e apresentou desempenho significativamente superior em relação a um traço convencional (sem resíduos) (ALMEIDA *et al.*, 2015, 2019; HEMKEMEIER *et al.*, 2022; MORETTI *et al.*, 2016, 2018). A Figura 7 apresenta a estrutura do programa experimental do presente estudo.

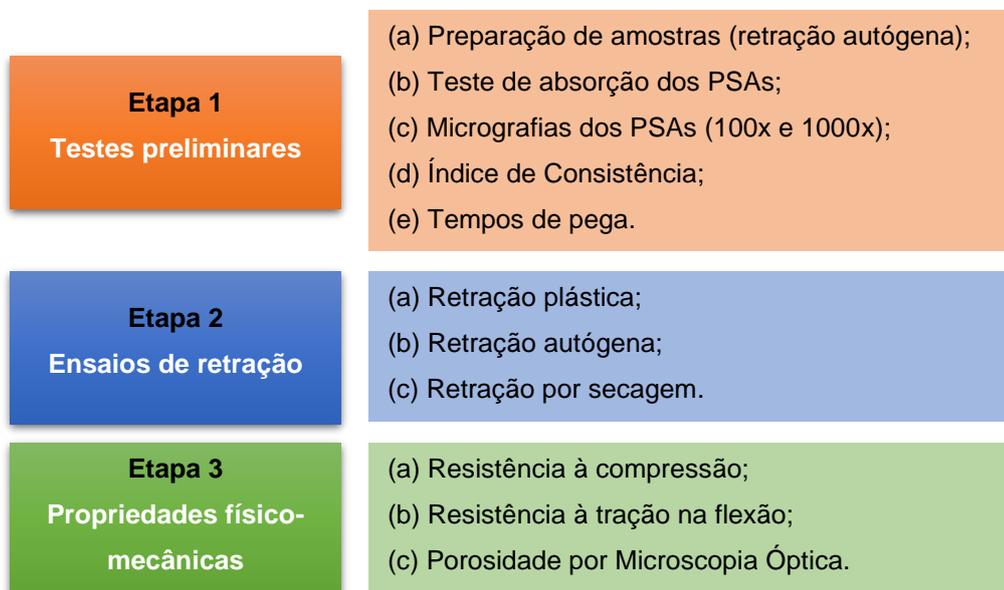


Figura 7 - Etapas do Programa experimental

O programa experimental foi dividido em três etapas. A primeira consistiu na realização dos testes preliminares, estes que auxiliaram na preparação das amostras, na comparação entre os diferentes tipos de materiais empregados e na definição da quantidade de água adicional aos traços. Na segunda etapa foram realizados os ensaios de retração, os quais envolveram retração plástica, autógena e por secagem. Enquanto na terceira e última etapa foi realizada a avaliação das propriedades físico-mecânicas dos traços em estudo, na qual foram englobados ensaios mecânicos focados na análise da densificação das matrizes cimentícias por parte da incorporação de ACBC e seu comportamento com a adição de PSA.

Como o grupo de estudos GESEC da UFSCar já vem desenvolvendo estudos com a ACBC em substituição ao agregado miúdo dos compósitos cimentícios, a maior parte dos materiais utilizados nesta pesquisa já foram caracterizados em pesquisas anteriores.

Esse programa experimental permitiu aprofundar os conhecimentos relacionados à utilização de polímeros superabsorventes, visando a redução da retração de compósitos cimentícios ecoeficientes. Ao final do estudo, buscou-se discutir a eficiência do uso de PSAs (com diferentes capacidades de absorção) como agentes de cura interna em diferentes matrizes cimentícias (com CP III e CP V ARI) e com e sem a incorporação de ACBC.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados neste estudo estão apresentados detalhadamente nas próximas seções.

4.1.1 Cimento Portland

Foram utilizados dois tipos de cimentos Portland de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018): o cimento de alta resistência inicial (CP V ARI 32), da fabricante Holcim, e o cimento com escória de alto-forno (CP III 32), da fabricado pela CSN. A Tabela 3

apresenta a composição química dos cimentos. As representações gráficas provenientes das análises por fluorescência de raios X estão apresentadas no Anexo A.

Tabela 3 - Composição química dos cimentos CP V ARI e CP III (por FRX) (%)

Elementos	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Outros elementos
CP V ARI	14,03	67,66	0,43	3,21	5,56	1,16	7,95
CP III	24,97	50,82	4,42	1,16	10,78	0,67	7,19

O motivo pelo qual optou-se na escolha desses tipos de cimento foi a diferença nas velocidades de reações proporcionadas por cada um deles. Esse fator está associado ao tamanho das partículas de cada cimento, na qual o cimento CP V ARI promove reações mais rápidas em decorrência das partículas mais finas em comparação ao cimento CP III. Isso se deve ao processo de fabricação onde o CP V ARI passa por um processo mais intenso de moagem. A predominância de escória no cimento CP III também faz com que as reações provenientes da presença desse cimento sejam mais lentas. Essa diferença favorece a análise dos comportamentos dos PSAs, uma vez que, quanto mais rápidas as reações de hidratação, mais propensos à retração e fissuração as argamassas e concretos se encontram.

4.1.2 Agregados miúdos (areia média, areia fina e ACBC)

Os agregados miúdos convencionais utilizados nessa pesquisa foram areias naturais de granulometria média e fina. Elas foram obtidas na região do Estado de São Paulo e caracterizados por Moretti e outros (2018) no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Suas características físicas estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características físicas das areias finas utilizadas na pesquisa

Características	Metodologia	Areia fina	Areia média
Massa específica (g/cm ³)	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	2,64	2,60
Massa unitária seca e solta (Kg/m ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021b)	1504,86	1623,42
Massa unitária compactada (Kg/m ³)	NBR 16972 (ABNT, 2021b)	1704,34	1682,02
Absorção de água (%)	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	0,34	0,46
Material pulverulento (%)	NBR 16973 (ABNT, 2021c)	1,33	0,35
Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	NBR 7218 (ABNT, 2010)	-	0,35
Impurezas orgânicas	NBR 17053 (ABNT, 2022)	Solução mais clara que a padrão	Solução mais clara que a padrão

Fonte: Moretti (2018)

A areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) foi utilizada em substituição parcial da areia fina, no teor de 30%. Esse resíduo foi coletado em uma usina sucroalcooleira no Estado de São Paulo, seco a 110 ± 5 °C por 24 horas e homogeneizado por peneira (#4,8 mm) e moinho mecânico (por 3 minutos). A composição química da ACBC por FRX está apresentada na Tabela 5 (MORETTI *et al.*, 2018).

Tabela 5 - Composição química da ACBC (por FRX)

Elementos	SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂	TiO ₂	PF ⁽¹⁾
ACBC	91,30	0,40	0,20	3,00	2,30	-	0,50	-	-	0,90	1,30

Nota ⁽¹⁾: Perda ao fogo

As principais características físicas dos agregados e da areia de cinza de bagaço de cana-de-açúcar estão apresentadas na Tabela 6. Enquanto a distribuição granulométrica dos agregados está apresentada na Figura 8.

Tabela 6 - Características físicas dos agregados

Materiais	ACBC	Areia fina	Areia média
Densidade (g/cm ³)	2,69	2,64	2,60
Dimensão máxima (mm)	1,18	0,60	4,80
Módulo de finura	1,15	1,32	2,54

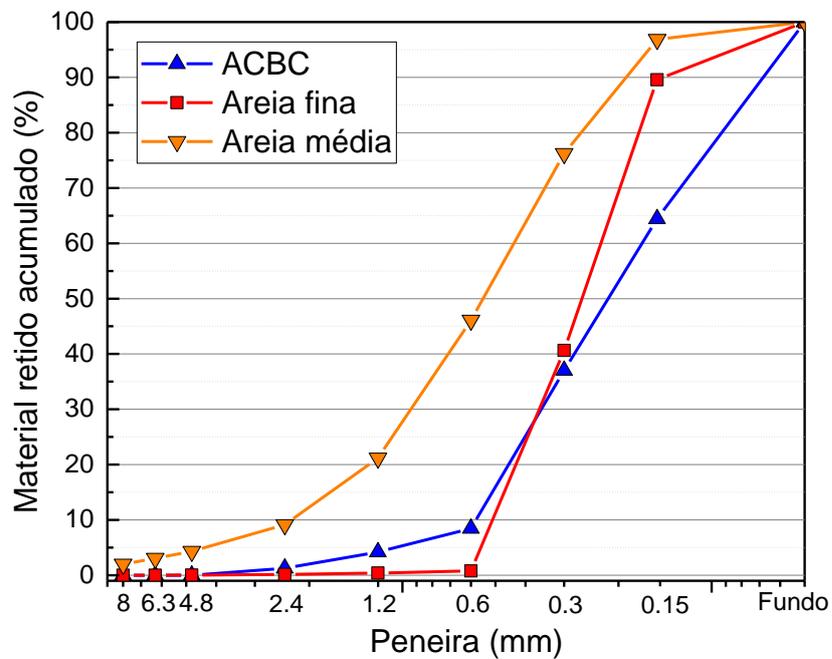


Figura 8 - Distribuição granulométrica dos agregados (ACBC, areia fina e areia média)

Com base na características físicas e granulometria dos agregados é possível notar a maior dimensão da areia média frente aos outros dois tipos de agregados. A fim de aprofundar a análise dessas características a Figura 9 apresenta a microscopia eletrônica de varredura (MEV) de amostras da ACBC (a), areia fina (b) e areia média (c).

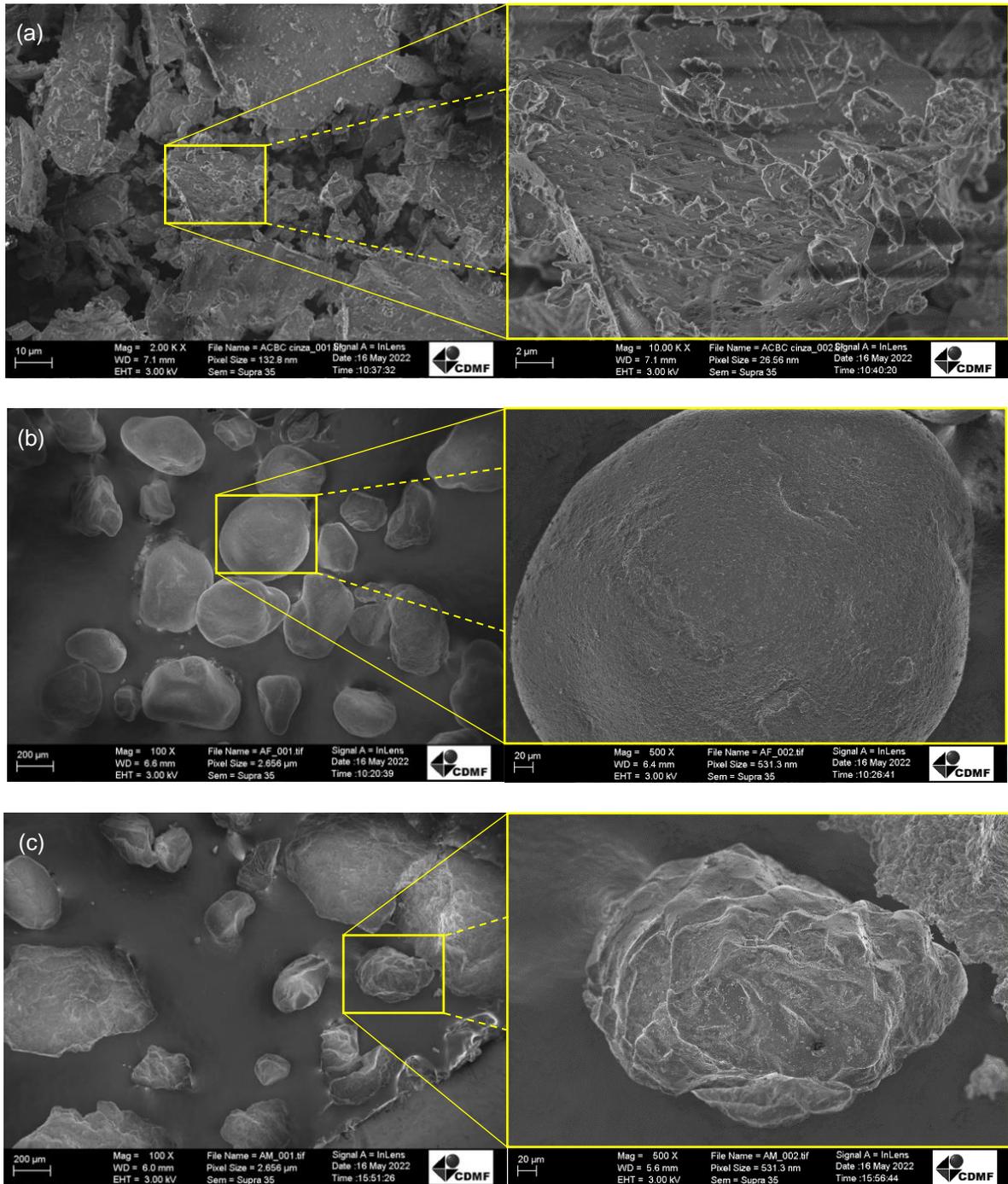


Figura 9 - MEV dos agregados: (a) ACBC (10 µm e 2 µm); (b) areia fina (200 µm e 20 µm); e (c) areia média (200 µm e 20 µm)

Por meio dessa investigação foi possível notar que a ACBC possui partículas significativamente mais finas que as areias naturais. Além disso, esse subproduto apresenta forma e textura mais irregulares do que as areias naturais, devido ao

processo de moagem realizado durante a homogeneização do material. Comparando as areias convencionais, percebe-se que a areia média possui textura mais irregular em comparação à superfície da areia fina.

Outras imagens foram obtidas utilizando microscópio óptico com ampliação de 1000x. Além de inspecionar a forma dos agregados, foi possível visualizar a diferença de tonalidades das partículas (Figura 10).

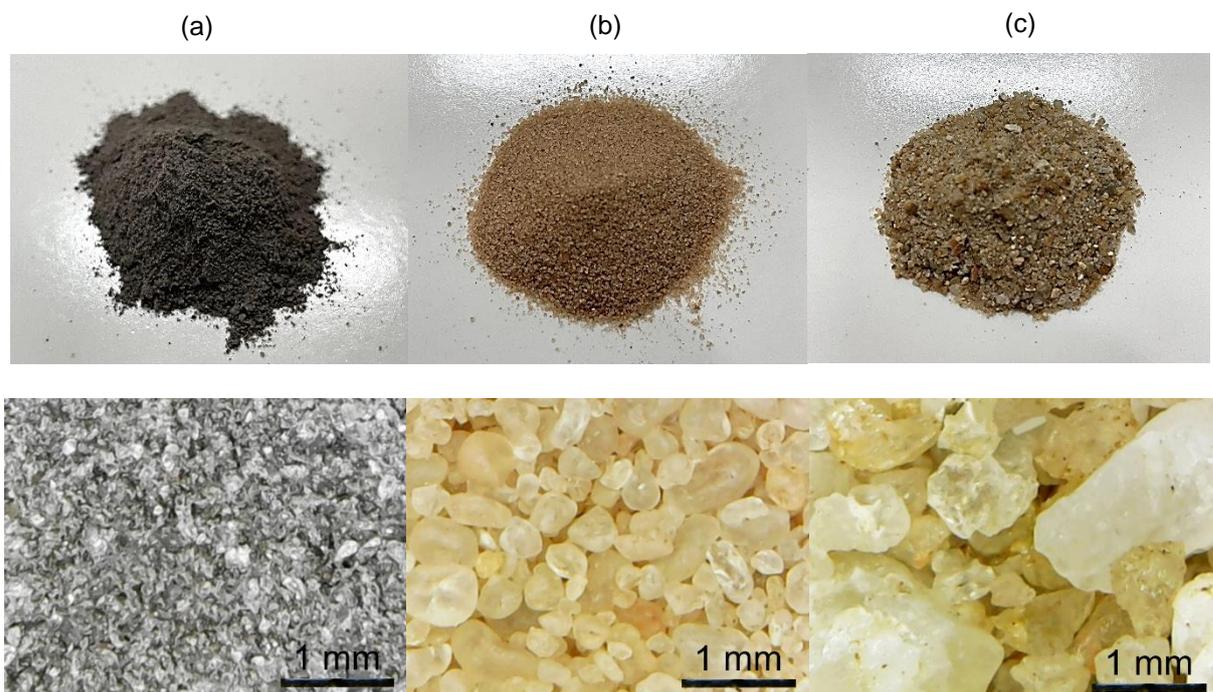


Figura 10 - Microscopia óptica dos agregados das argamassas (ampliação de 1000x): (a) ACBC; (b) areia fina; e (c) areia média

As imagens realizadas pelo microscópio óptico na mesma ampliação para todos os agregados confirma a diferença de granulometria entre as partículas de cada material. A areia média possui partículas maiores, seguida da areia fina e, por fim, a ACBC. A tonalidade das partículas de ACBC é acinzentada e mais escura, enquanto as areias naturais possuem tons mais claros e próximos ao bege. Com relação ao formato dos grãos, a microscopia óptica confirma a maior regularidade no formato da areia fina diante dos outros dois tipos de agregados, sendo a ACBC a areia mais irregular.

4.1.3 Superplastificante

Para permitir a produção de compósitos cimentícios com baixas relações a/c e incorporação de ACBC, foi utilizado um aditivo superplastificante a base de policarboxilatos. A necessidade por baixas relações entre a água e aglomerante ocorreu com o intuito de provocar a maior retração possível das amostras ensaiadas, possibilitando uma análise mais precisa dos resultados. O aditivo utilizado foi o CQ Flow 37 da marca Camargo Química. Esse produto possui coloração branca translúcida e densidade de 1,02 - 1,10 g/cm³, segundo informações do fabricante. Além disso, o fabricante recomenda a dosagem de 0,5 a 1,0% em relação a massa de cimento das misturas.

4.1.4 Polímeros superabsorventes

Três tipos de polímeros superabsorventes (PSA), denominados A, B e C, foram utilizados no estudo experimental. As amostras foram doadas pela *BASF Construction Additives GmbH* (Trostberg, Alemanha). Todos os PSAs são a base de poliacrilamida, com diferentes capacidades de absorção de água (definidas pelo processo de polimerização e tamanho de partículas), conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Características dos PSA fornecidas pelo fabricante

PSA	Tipo	d10 / d50 / d90 (µm)	Absorção de água ⁽¹⁾ (g/g)
A - VP 300	Polimerização em gel (partículas trituradas)	15 / 50 / 100	≈ 25
B - VP 400	Polimerização em gel (partículas trituradas)	25 / 70 / 140	≈ 30
C - VP 600	Polimerização em suspensão inversa (partículas esféricas)	50 / 90 / 150	≈ 45

Nota ⁽¹⁾: Determinado pelo método *tea-bag* após 24 horas em solução (água deionizada com 5% de cimento Portland - CEM I (BSI, 2011))

As amostras de PSA foram armazenados em recipientes opacos e vedados em ambiente laboratorial ($T = 21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $UR = 40 \pm 5\%$). Essa precaução foi tomada para garantir que o material não entrasse em contato direto com a luz solar ou qualquer vapor d'água, pois isso causaria uma possível degradação e alteração nas propriedades de absorção dos polímeros (SCHRÖFL; SNOECK; MECHTCHERINE, 2017). A Figura 11 apresenta os polímeros superabsorventes antes e após o contato com água.

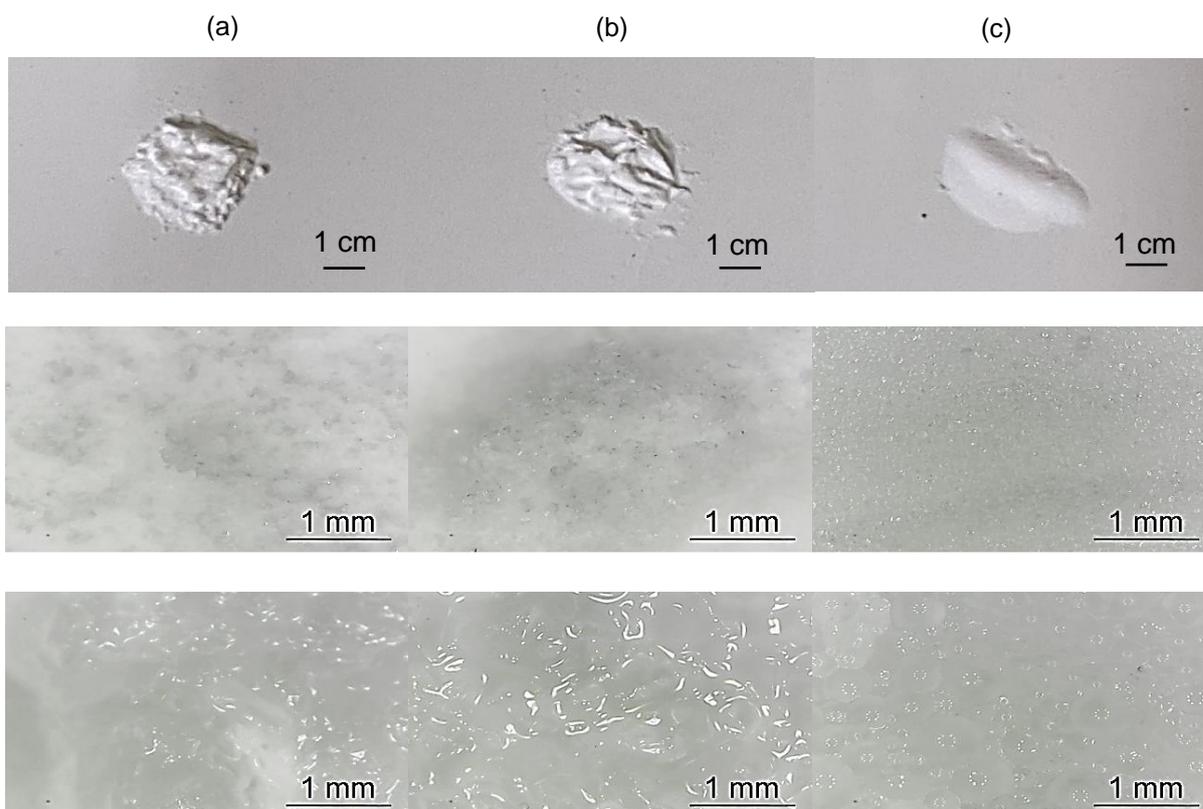


Figura 11 - PSAs antes e após o contato com a água com ampliação de 1000x: (a) PSA-A; (b) PSA-B; e (c) PSA-C

A primeira linha de imagens se refere ao material seco sem ampliação (obtidas por câmeras convencionais). A segunda e terceira linhas apresentam microscopias ópticas com ampliação de 1000x, antes e após 15 segundos de contato com água deionizada, respectivamente. Nota-se que as partículas dos PSAs A e B possuem formas irregulares, enquanto o PSA-C possui partículas arredondadas e bem definidas. Isso se comprova após a aplicação de água nos PSAs, quando o PSA-C

apresenta uma estrutura mais uniforme à medida que absorve água para seu interior. Cada PSA possui capacidade de absorção de água diferente, a qual depende do tipo de polímero e da solução de contato utilizada.

A capacidade de absorção de cada polímero superabsorvente foi avaliada pelo método gravimétrico *tea-bag* em água deionizada (SCHRÖFL; SNOECK; MECHTCHERINE, 2017). A Figura 12 apresenta o ensaio para determinação da capacidade de absorção de água dos polímeros superabsorventes em solução aquosa.

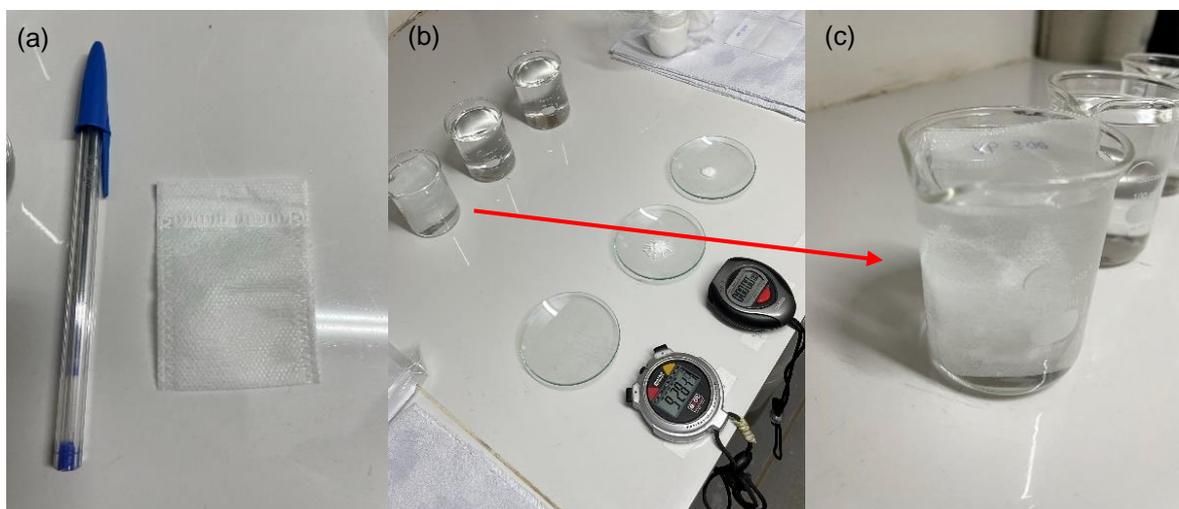


Figura 12 - Ensaio de absorção de água dos PSA: (a) saquinho de chá, (b) e (c) imersão em solução aquosa

Esse ensaio consistiu em introduzir 0,1 g em massa de partículas secas de PSA em um saquinho de chá de tecido não tecido (TNT), pré-umedecido com água deionizada. Após introduzir o material no saquinho, o conjunto foi imerso em um béquer com 100 ml de água deionizada. Foram realizadas leituras das massas do gel de PSA nos tempos de 1, 5, 10, 30, 60, 180 min e 1, 2 e 3 dias após a imersão do saquinho de chá. O sistema foi coberto por plástico filme para evitar a perda de líquido para o ambiente. Antes de cada registro de massa, os saquinhos foram retirados do béquer e secos superficialmente com um pano seco em no máximo 30 segundos.

Após a pesagem, o saquinho de chá com o gel de PSA foi devolvido à água deionizada até a próxima pesagem.

A capacidade de absorção de água foi calculada por meio da Equação 1:

$$Cab = \frac{m_3 - m_2 - m_1}{m_1} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Cab é a capacidade de absorção (g/g);

m_1 é a massa do PSA seco (g);

m_2 é a massa do saquinho de chá (g);

m_3 é a massa do gel de PSA com o saquinho de chá (g).

4.2 Preparação dos corpos de prova

Esta seção apresenta as composições das argamassas utilizadas no estudo, além dos métodos de preparação dos corpos de prova para cada ensaio.

4.2.1 Traços das argamassas

Os traços das argamassas utilizados para a confecção dos corpos de prova de referência (REF) e de ACBC foram baseados nas quantidades de materiais utilizadas por Moretti e outros (2018). Em seu estudo, concluiu-se a substituição de 30% do agregado miúdo (porção fina) por ACBC resulta em um concreto com menor porosidade, maior resistência mecânica e maior resistividade elétrica comparado a um concreto referência. Na ocasião, os autores utilizaram uma relação água/cimento (a/c) de 0,55 para obtenção de uma consistência plástica (235 ± 10 mm de espalhamento na *flow table*). Com o intuito de intensificar o efeito da autodessecação e permitir uma

melhor avaliação do comportamento dos PSA, os traços foram ajustados para uma relação a/c efetiva de 0,4 (JENSEN; HANSEN, 2001). Assim, para manutenção da consistência plástica obtida por Moretti e outros (2018), foi adicionado aditivo superplastificante às misturas no teor de 1%. A Tabela 8 apresenta um resumo dos traços de argamassa utilizados para confecção dos corpos de prova.

Tabela 8 - Traço em massa modificado para o estudo

Traço	Cimento	Areia fina	Areia média	ACBC	Aditivo superplastificante	Relação a/c
REF	1,000	1,350	1,650	0,000	0,010	0,40
ACBC	1,000	0,946	1,650	0,413	0,010	0,40

Todos os corpos de prova foram moldados com relação efetiva (a/c ef.) de 0,4. No entanto, a soma total de água (a/c total) se deu pela quantidade efetiva mais a porção adicional (a/c ad.) para manter a mesma consistência plástica (235 ± 10 mm) após adição dos polímeros superabsorventes. Alguns estudos optaram por fixar a quantidade de água conforme o polímero superabsorvente de maior absorção (KLEMM; ALMEIDA; SIKORA, 2016; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021). No entanto, optou-se pela fixação da consistência a partir do ensaio na mesa de consistência (*flow table*) para garantir que não houvesse influência de água excessiva no caso de polímeros superabsorventes com menores capacidades de absorção. O excesso de água pode influenciar no comportamento das argamassas, sobretudo na retração, a qual é mais pronunciada em traços com menores quantidades de água (JENSEN; HANSEN, 2001; MECHTCHERINE *et al.*, 2021). Essa abordagem de manutenção da consistência e variação da relação a/c total também foi utilizada por Snoeck, Jensen e De Belie (2015), Mechtcherine e outros (2018), e Wyrzykowski e Lura (2016).

Os polímeros superabsorventes foram adicionados às misturas nas proporções de 0,25% da massa de cimento, pois diversos estudos tiveram sucesso ao utilizar proporção entre 0,25 e 0,30% (KLEMM; ALMEIDA; SIKORA, 2016; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021; SCHRÖFL *et al.*, 2022). Essa proporção é pautada na

performance dos traços com PSAs nos ensaios mecânicos quando utilizado até 0,30% de PSA em relação ao aglomerante da mistura (BEUSHAUSEN; GILLMER; ALEXANDER, 2014; JENSEN; HANSEN, 2001; MECHTCHERINE; REINHARDT, 2012).

Com base nos traços apresentados anteriormente, foram estabelecidas várias composições, com nomenclaturas diferentes, a fim de analisar o comportamento das argamassas com dois tipos diferentes de cimento e três tipos de polímeros superabsorventes (Figura 13).

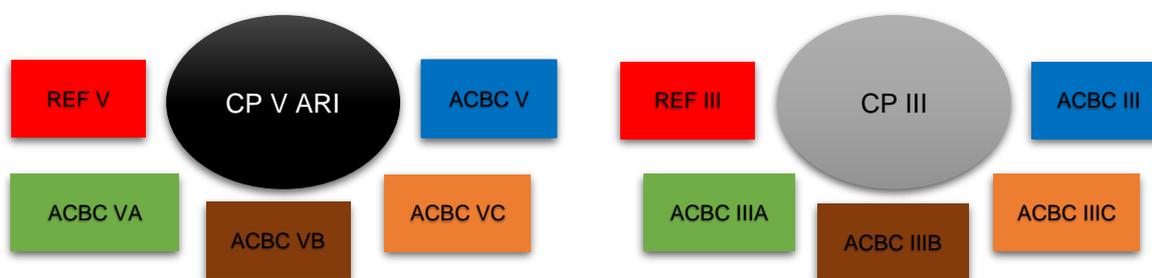


Figura 13 - Nomenclatura das argamassas de acordo com o cimento e PSA utilizados

As nomenclaturas REF e ACBC correspondem ao traço de referência e com ACBC, respectivamente. As nomenclaturas seguidas com V se referem aos CPs moldados com cimento CP V ARI, enquanto as com III se referem ao cimento CP III. Por fim, a inclusão das letras A, B e C indicam o tipo de PSA utilizado, representados pelas cores verde, marrom e laranja, respectivamente.

Conforme exposto anteriormente, a relação a/c foi calculada por meio do ensaio de índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). Primeiramente foram testadas as amostras referência, sem a adição de polímeros superabsorventes (REF V, REF III, ACBC V e ACBC III) com a/c de 0,4. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Determinação da relação a/c das argamassas com diferentes PSAs

	Traço	(a/c ef.)⁽¹⁾ efetiva	(a/c ad.)⁽²⁾ adicional	(a/c) total
REF	V	0,40	-	0,40
	III	0,40	-	0,40
ACBC	V	0,40	-	0,40
	VA	0,40	0,05	0,45
	VB	0,40	0,11	0,51
	VC	0,40	0,13	0,53
	III	0,40	-	0,40
	IIIA	0,40	0,05	0,45
	IIIB	0,40	0,11	0,51
	IIIC	0,40	0,13	0,53

⁽¹⁾ (a/c ef.): Relação água/cimento efetiva;

⁽²⁾ (a/c ad.): Relação água/cimento adicional.

Foram obtidos os valores de a/c adicionais de 0,05 para PSA-A, 0,11 para PSA-B e 0,13 para PSA-C para ambos os cimentos, a fim de manter o índice de consistência pré-estabelecido (235 ± 10 mm).

A Tabela 10 apresenta as composições dos traços com as quantidades de materiais após os ajustes de relação a/c de cada traço.

Tabela 10 - Composições das argamassas utilizadas (em massa)

Traço	Cimento CP V ARI (g)	Cimento CP III (g)	Areia fina (g)	Areia média (g)	ACBC (g)	PSA A (g)	PSA B (g)	PSA C (g)	Aditivo (g)	Água total (g)
REF V	1000	-	1350	1650	-			-	10	400
REF III	-	1000	1350	1650	-			-	10	400
ACBC V	1000	-	946	1650	413	-	-	-	10	400
ACBC VA	1000	-	946	1650	413	2,5	-	-	10	450
ACBC VB	1000	-	946	1650	413	-	2,5	-	10	510
ACBC VC	1000	-	946	1650	413	-	-	2,5	10	530
ACBC III	-	1000	946	1650	413	-	-	-	10	400
ACBC IIIA	-	1000	946	1650	413	2,5	-	-	10	450
ACBC IIIB	-	1000	946	1650	413	-	2,5	-	10	510
ACBC IIIC	-	1000	946	1650	413	-	-	2,5	10	530

Mesmo que a utilização do cimento CP III promoveu maior espalhamento após o ensaio de índice de consistência, esse resultado não ultrapassou os limites pré-estabelecidos. Por isso, a relação a/c de cada um dos traços foi mantida, independente do tipo de cimento utilizado, a fim de impedir o a interferência de um novo parâmetro nos resultados.

4.2.2 Procedimento de mistura

Para moldagem dos corpos de prova em ambiente laboratorial (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $50 \pm 5\%$) foi utilizada a sequência de mistura apresentada na Tabela 11.

Tabela 11 - Sequência de mistura da argamassa

Etapas	Tempo	Tempo Acumulado
Misturar agregados miúdos	1 minuto	1'
Adicionar 90% da água	30 segundos	1'30"
Misturar e adicionar superplastificante	30 segundos	2'
Parar e raspar laterais	30 segundos	2'30"
Ligar e adicionar cimento e polímeros	30 segundos	3'
Misturar	30 segundos	3'30"
Parar e raspar laterais	30 segundos	4'
Ligar e adicionar 10 % de água e misturar	1 minuto	5'
Parar e raspar laterais	30 segundos	5'30"
Misturar	1 minuto e 30 segundos	7'

A primeira coluna da tabela apresenta as etapas do procedimento de mistura, a segunda, o tempo de cada etapa, e a terceira e última, o tempo acumulado das etapas para que seja realizado um controle contínuo por cronômetro. Optou-se pela adição do superplastificante no início do procedimento, logo após a homogeneização da água com os agregados, a fim de acelerar o seu efeito, em virtude de que os polímeros afetam drasticamente a trabalhabilidade das misturas e são adicionados logo após, juntamente ao cimento. Com a adição do superplastificante ao final da mistura, como geralmente é realizada, as misturas apresentariam baixa trabalhabilidade por conta da rápida absorção da água de amassamento pelos polímeros superabsorventes. As misturas foram realizadas em uma argamassadeira mecânica com capacidade de 5L e na velocidade lenta, conforme a Figura 14.



Figura 14 - Procedimento de mistura: (a) Adição dos Agregados; (b) Mistura seca dos agregados; (c) Mistura úmida dos agregados; e (d) Argamassa final com cimento

Os polímeros superabsorventes foram adicionados juntamente ao cimento, conforme a tabela do procedimento, no entanto, não alteram a coloração da mistura por serem incolores após o contato com água e transformação em hidrogel. Após a mistura, os moldes foram preenchidos com as argamassas para cada ensaio a ser realizado, conforme as normas que os padronizam.

4.3 Testes Preliminares

A realização do controle das propriedades do estado fresco dos materiais cimentícios durante os testes preliminares determina as operações iniciais e refletem no desempenho do estado endurecido dos traços ensaiados, ou seja, na qualidade final do compósito cimentício. Todos os ensaios foram realizados em temperatura laboratorial de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(50 \pm 5) \%$.

4.3.1 Índice de Consistência

A consistência é uma medida da fluidez e/ou umidade da argamassa fresca e indica a deformabilidade da mistura quando submetida a determinado tipo de tensão. Esta propriedade foi determinada na mesa manual de consistência com base na NBR 13276 (ABNT, 2016), conforme a Figura 15.

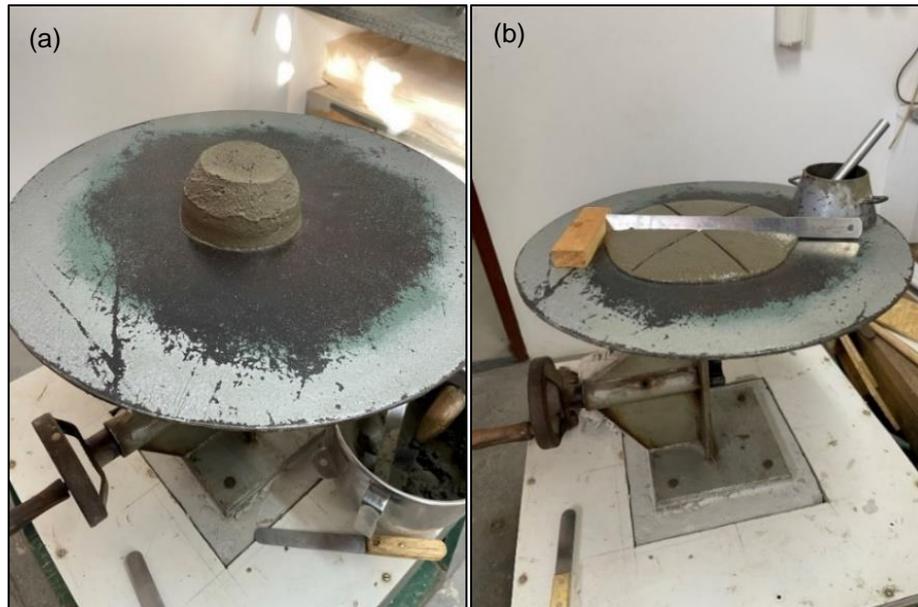


Figura 15 - Ensaio de consistência na mesa manual de consistência antes (a) e depois do espalhamento (b)

O ensaio consistiu em limpar a superfície da mesa e a parede do molde na forma de cone com pano umedecido e, após a preparação da argamassa a ser ensaiada, com o molde posicionado no centro da mesa, o mesmo foi preenchido com argamassa em três camadas compactadas com 15, 10 e 5 golpes cada, por meio de soquete. Após a compactação da última camada (5 golpes), foi realizado o rasamento da superfície utilizando uma régua metálica com movimentos de vai e vem ao longo do topo do molde. Feito isso, a superfície da mesa no entorno do molde foi limpa para não proporcionar interferência nos resultados ensaio. Em seguida, o molde foi removido com cuidado e o ensaio teve início acionando a manivela da mesa, a qual foi controlada para que houvesse 30 quedas em 30 segundos com auxílio de um cronômetro. Após a última queda, foram realizadas três medidas de diâmetros com um paquímetro. A partir disso, foi possível calcular o índice de consistência de cada traço do estudo, realizando a média das três medidas de diâmetro coletadas de cada argamassa.

Esse método foi utilizado para realizar a dosagem de aditivo superplastificante e o ajuste da relação água/cimento total com adição de PSA.

4.3.2 Tempos de pega

O tempo de pega é o que determina a evolução inicial da hidratação do cimento. Os tempos de pega inicial e final indicam mudanças no comportamento de solidificação das misturas. Assim, correspondem a etapas que definem o limite máximo de manuseio (perda de trabalhabilidade) e o início do desenvolvimento da resistência mecânica, respectivamente.

Os tempos de pega foram analisados para cada traço do estudo, com ambos os cimentos. Eles foram medidos por agulha de Vicat, seguindo a norma NBR 16607 (ABNT, 2018), utilizando o aparato de medição apresentado na Figura 16. Neste ensaio, o molde foi preenchido com argamassa fresca e a agulha de Vicat foi solta até penetrar na argamassa.



Figura 16 - Aparato experimental para medição dos tempos de pega por agulha de Vicat

O tempo inicial de pega foi medido desde o momento em que a água entrou em contato com o cimento durante o processo de mistura até o instante em que a distância entre a agulha e a placa de base foi de 4,0 mm. Após essa verificação, o molde foi invertido de posição para averiguar o tempo de fim de pega, este que foi definido até

o momento em que a agulha não penetrasse mais do que 0,5 mm na amostra. O tempo de pega inicial foi monitorado de 10 em 10 minutos, enquanto o tempo de pega final, de 30 em 30 minutos.

4.4 Ensaio de Retração

Os ensaios de retração avaliam desde a variação dimensional até o controle de fissuras das amostras quando expostas a situações de temperatura e umidade controladas. Assim, o controle das propriedades do estado endurecido indica o desempenho e a durabilidade das argamassas, apresentando sua capacidade de atuação sob serviço para esses compósitos cimentícios.

4.4.1 Ensaio de Retração Plástica

O ensaio de retração plástica foi realizado com base na norma C 1579-13 (ASTM, 2013), no qual foi necessária uma adaptação dos moldes e avaliou os efeitos da evaporação e retração precoce em 24 horas. Para esse ensaio, logo após a mistura de cada traço, as amostras foram levadas aos moldes e submetidas a condições especialmente projetadas para indução de fissuras e manutenção da umidade. Para evitar a variação dos resultados, como os moldes foram adaptados, optou-se pela utilização de um corpo de prova para cada traço avaliado. No entanto, foram realizadas medições em triplicata em decorrência das chapas metálicas introduzidas ao longo da preparação dos moldes, a qual será detalhada a seguir.

Com a utilização de moldes projetados para os ensaios de retração plástica, foram produzidos corpos de prova prismáticos de 140 mm x 140 mm x 18 mm para cada composição de argamassa. Para indução das fissuras decorrentes da retração plástica, três chapas metálicas com 0,3 mm de espessura foram posicionadas paralelamente a uma das laterais de cada corpo de prova. A distância entre as chapas e das hastes até a borda do CP foi simétrica em relação às chapas e a borda. Cada chapa foi fixada no suporte do molde produzido em madeira a fim de garantir a

estabilidade vide a inserção da argamassa. A borda livre entre as placas metálicas e a superfície externa do corpo de prova foi de 5 mm. A Figura 17 apresenta um esquema ilustrando a confecção dos moldes para o ensaio de retração plástica.

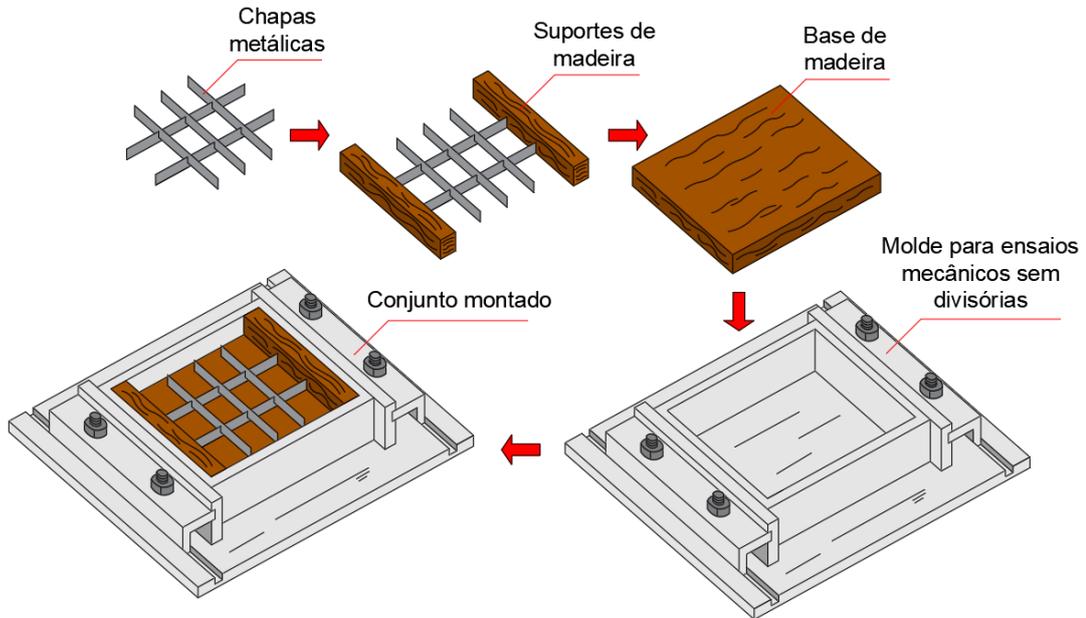


Figura 17 - Esquema de montagem do molde para ensaio de retração plástica

Seguindo os passos do esquema anterior, os moldes foram preparados conforme as medidas da Figura 18 e passo a passo da Figura 19.

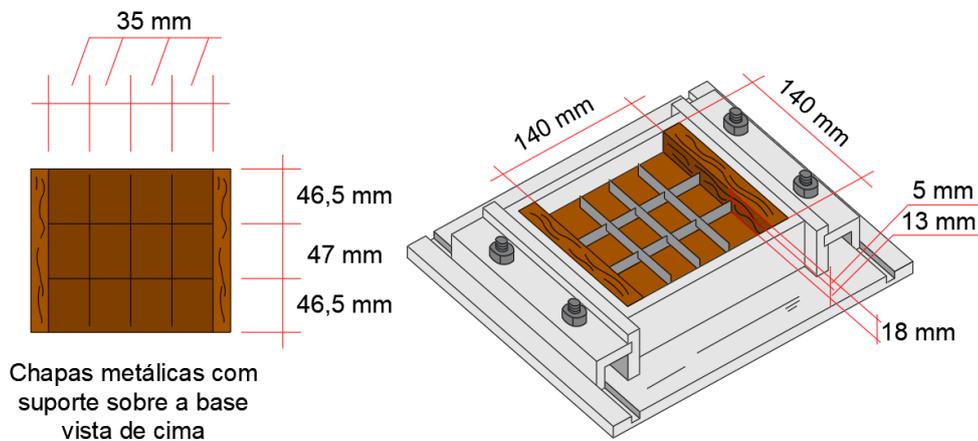


Figura 18 - Dimensões do molde para ensaio de retração plástica

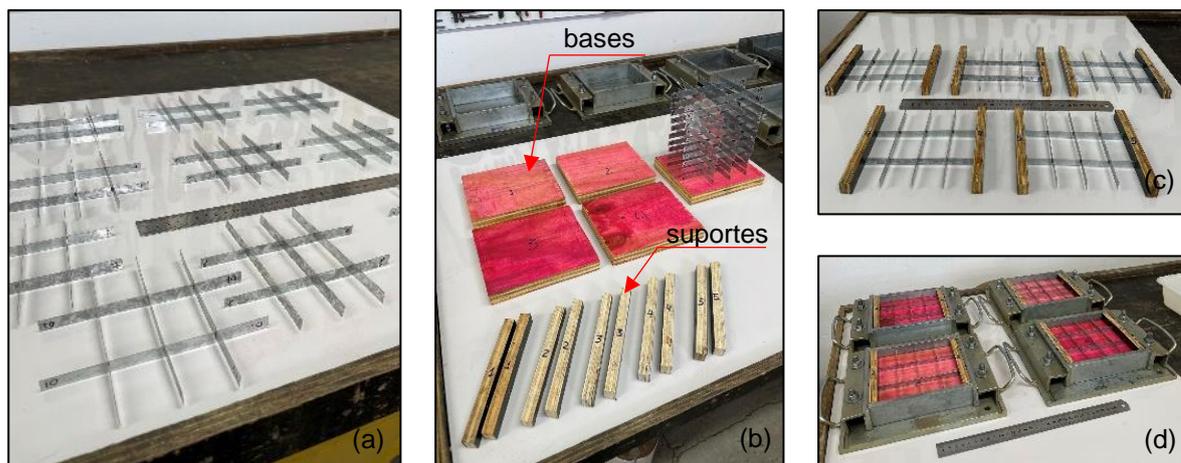


Figura 19 - Confeção dos moldes: (a) chapas metálicas; (b) peças em madeira compensada; (c) União entre chapas e suportes de madeira; (d) montagem final do molde

A Figura 19a apresenta a etapa de confecção e montagem das chapas metálicas. Essas peças têm como função induzir a fissuração em determinados pontos dos corpos de prova, por isso foram dimensionadas para que tivessem distâncias proporcionais entre uma chapa e outra e das chapas até a borda. Após o corte das chapas, as mesmas foram acopladas umas sobre as outras em cavidades previamente abertas e coladas para que não houvesse interferência no posicionamento das mesmas durante a etapa de adensamento por mesa vibratória.

Os moldes utilizados como paredes de sustentação dos corpos de prova foram os mesmos utilizados no ensaio de resistência à compressão. No entanto, para o desenvolvimento do ensaio de retração plástica, foi necessário remover as divisões de corpos de prova prismáticos 4 x 4 cm objetivando corpos de prova com áreas de superfície maiores. Assim, foram desenvolvidos suportes em madeira compensada que tiveram a função de tamponar as cavidades do molde, bem como servir como pontos de fixação do sistema de chapas metálicas (Figuras 19b e 19c). Além disso, a fim de reduzir a altura do corpo de prova (antes de 4 cm), foram confeccionadas bases também de madeira compensada (depois de 1,8 cm), as quais foram untadas com óleo mineral antes do ensaio com o intuito de facilitar a desmoldagem e minimizar a absorção de água por essas peças (Figura 19b). Por fim, a estrutura externa do molde do ensaio de resistência à compressão foi posicionada sobre superfície plana, a base

de madeira compensada disposta no seu interior, finalizando com a colocação dos suportes com chapas metálicas indutoras de fissuras (Figura 19d).

Os moldes foram preenchidos com argamassa em duas camadas, seguida de compactação em mesa vibratória conforme o esquema da Figura 20. Em seguida, foram mantidos em estufa capacitada com ventilação ($40 \pm 3^\circ\text{C}$ e $15 \pm 10\%$ UR) por 24 horas, situação na qual valores foram ligeiramente ajustados daqueles recomendados pela C 1579-13 (ASTM, 2013) a fim de facilitar o aparecimento de fissuras nos corpos de prova. Pela norma padrão esses valores recomendados são de temperatura de $36 \pm 3^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $30 \pm 10\%$.

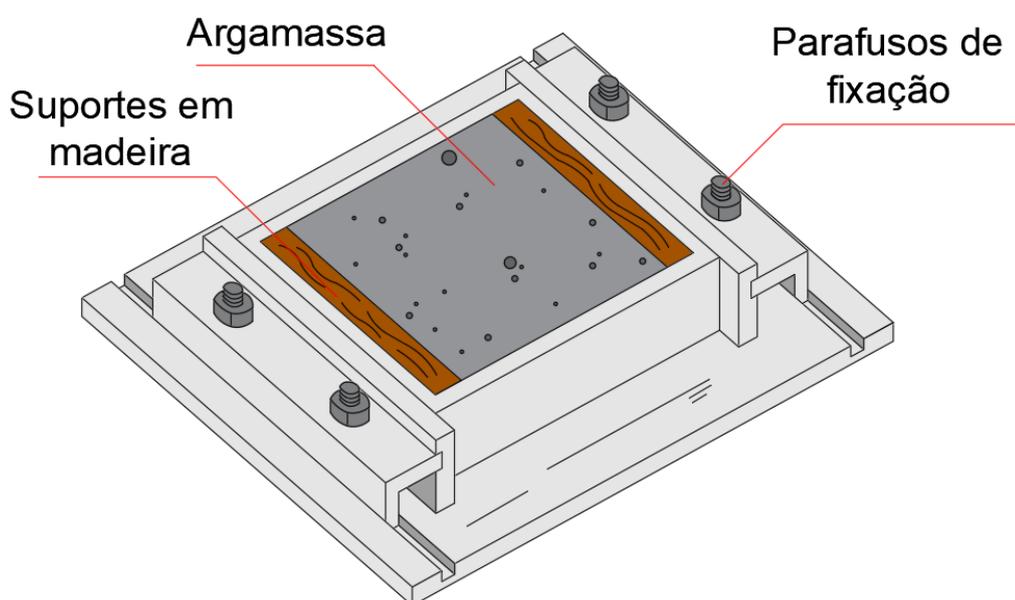


Figura 20 - Molde com argamassa para ensaio de retração plástica

A perda de umidade foi controlada periodicamente para avaliar a taxa de evaporação de água do sistema (MIGNON *et al.*, 2017). Para isso a massa do molde vazio foi registrada e ao longo do ensaio foram registradas de uma em uma hora até 8 horas e aferida novamente passadas 24 horas (final do ensaio). A Figura 21 apresenta o desenvolvimento do ensaio desde a acomodação da argamassa nos moldes até a retirada da estufa.

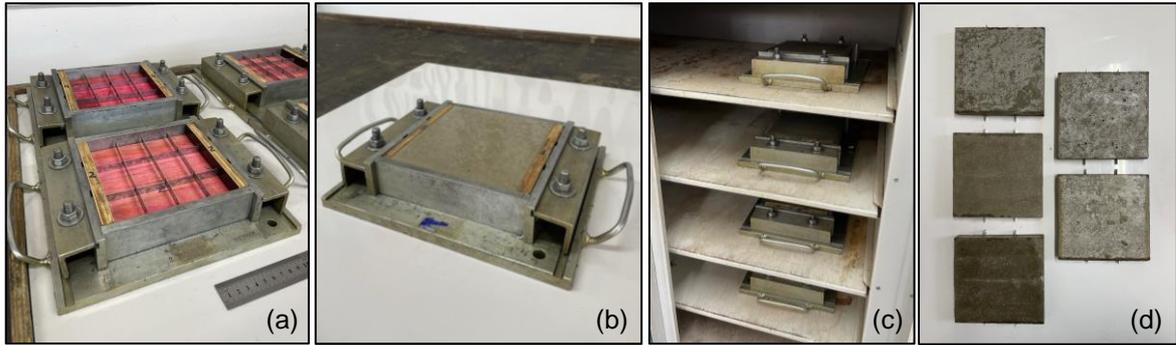


Figura 21 - Desenvolvimento do ensaio de retração plástica: (a) moldes preparados; (b) molde com argamassa no estado fresco; (c) moldes armazenados em estufa ventilada ($40 \pm 3^{\circ}\text{C}$); (d) corpos de prova removidos do molde (após 24h de ensaio)

Ao final da cura (24h), os corpos de prova das argamassas foram desmoldados e as fissuras na superfície livre foram analisadas em microscópio óptico. Foram capturadas três imagens da superfície de cada corpo de prova, situadas sobre a região das chapas metálicas introduzidas na argamassa. As nomenclaturas utilizadas para interpretação dos resultados foram: lado esquerdo (LE), lado direito (LD) e parte central (C). Todas as amostras foram analisadas com ampliações de 100 e 1000 vezes. A dimensão das fissuras foi verificada por meio da escala produzida pelo microscópio óptico utilizado, e tratamento pelo *software ImageJ*, no qual foram coletadas três espessuras da porção central de cada traço, região na qual houve maior incidência de fissuras por conta do maior distanciamento das laterais do molde. A partir dessas medidas foi calculada a média e o desvio padrão com o intuito de auxiliar na interpretação dos resultados.

4.4.2 Ensaio de Retração autógena

O ensaio de retração autógena consiste em averiguar a variação dimensional de um compósito cimentício, na qual a retração acontece sob condições de temperatura e umidade controladas.

Um dos métodos de ensaio mais utilizados para análise da retração autógena é utilizando um sistema de tubo corrugado padronizado pela ASTM C1698 (ASTM,

2019). A variação dimensional linear é aferida com os compósitos cimentícios no estado endurecido após o posicionamento dos tubos de plástico corrugados em uma estrutura rígida (WYRZYKOWSKI *et al.*, 2018). No presente estudo foi realizada uma adaptação desse método, na qual, ao invés de utilizar tubos corrugados, foram moldados corpos de prova prismáticos. Esses CPs foram revestidos com papel alumínio e parafina a fim de impedir a saída de água da mistura ao longo do processo de cura, conforme descrito nesta seção.

Assim, o ensaio de retração autógena foi realizado com base na NBR 15261 (ABNT, 2005a). Após a mistura, os corpos de prova foram moldados em formas metálicas de 25 x 25 x 285 mm (Figura 22), previamente untadas com desmoldante (óleo mineral).

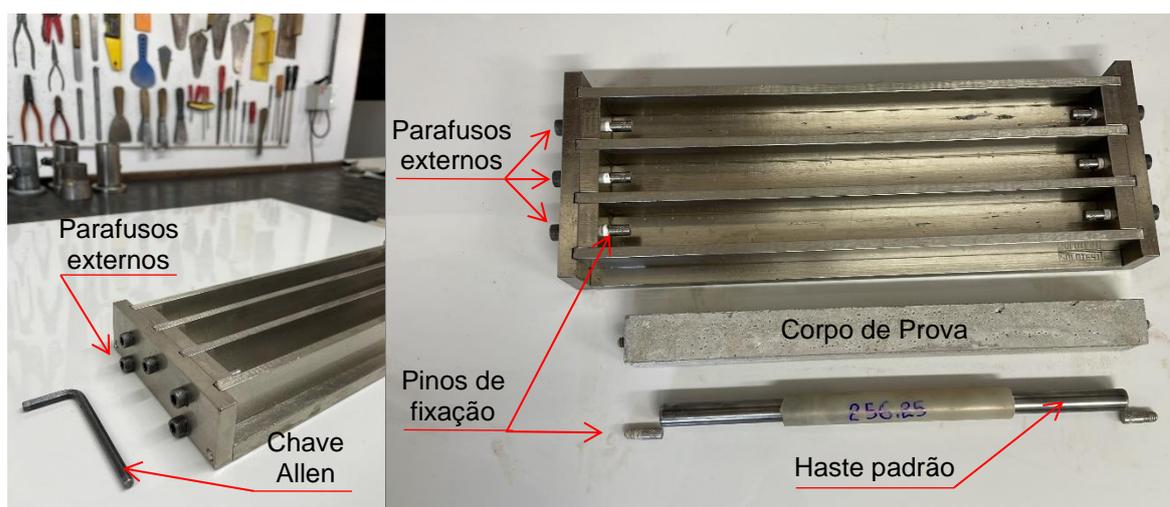


Figura 22 - Molde prismático para ensaio de retração autógena

A preparação do molde é importante para conferir simetria aos corpos de prova, uma vez que, os mesmos possuem dois pinos que ficam salientes dos CPs e tem como função, a fixação no aparelho comparador de medição da variação dimensional. Por isso, esses pinos devem ser encaixados no molde de forma simétrica para garantir confiabilidade aos resultados dos ensaios. A Figura 23 apresenta um esquema com as dimensões do molde utilizado no ensaio de retração autógena (ABNT, 2005a).

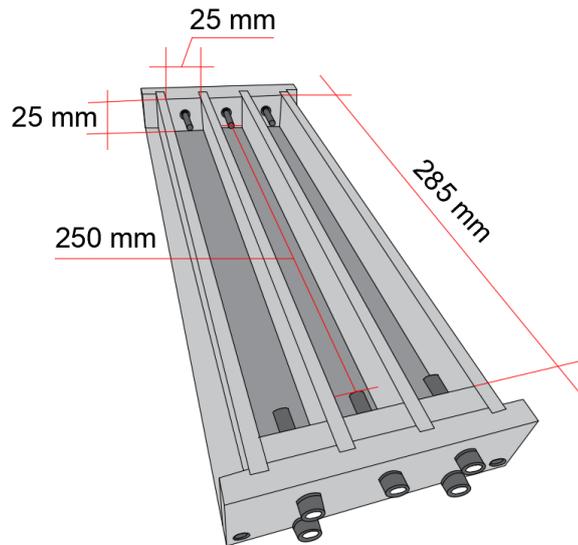


Figura 23 - Dimensões do molde prismático para ensaio de retração autóloga (mm)

Com o molde já preparado, a argamassa foi inserida utilizando uma espátula metálica, em duas camadas, com aplicação de 25 golpes em cada camada, por meio de soquete, tomando cuidado para não interferir no posicionamento dos pinos e garantir a compactação nas extremidades, com o intuito de obter um corpo de prova homogêneo. Após a compactação da segunda camada, o excesso de argamassa foi removido e foi realizado o alisamento da superfície com uma régua. Terminada a moldagem, os parafusos externos do molde foram removidos com o intuito de permitir a movimentação livre dos corpos de prova durante a cura inicial.

Por fim, os corpos de prova foram cobertos por plástico filme para evitar a perda de água para o ambiente da câmara seca (23 ± 2) °C, onde permaneceram por durante 24 horas, até a desmoldagem. A Figura 24 apresenta as etapas da moldagem dos corpos de prova prismáticos para os ensaios de retração autóloga até a cura inicial.



Figura 24 - Etapas de moldagem dos corpos de prova prismáticos para ensaio de retração autógena até a cura inicial (a) Mistura; (b) Fixação dos pinos após aplicação de óleo; (c) aplicação da argamassa em duas camadas; (d) regularização da superfície; e (e) armazenamento em câmara seca

Foram moldados três corpos de prova para cada traço. Cada molde representa um traço em triplicata para análise, conforme as composições apresentadas na seção 4.2.1. Passadas as 24 horas destinadas à cura inicial dos corpos de prova, estes foram desmoldados e na sequência revestidos com folha de papel alumínio e pintados, com auxílio de pincel, com parafina. Isso foi essencial para evitar a perda de água da mistura para o ambiente, na tentativa de garantir que qualquer retração que ocorresse na amostra fosse exclusivamente proveniente das reações químicas em curso, configurando o ensaio de retração autógena.

Cinco tipos de revestimento foram avaliados para assegurar uma efetiva selagem do corpo de prova com mínima perda de água para o ambiente. Isso foi necessário para adaptação do ensaio utilizando tubos plásticos corrugados e flexíveis descrito pela ASTM C1698 (ASTM, 2019), recomendado por RILEM TC 260-RSC (WYRZYKOWSKI *et al.*, 2018) e utilizado em outros estudos (MELO NETO; CINCOTTO; REPETTE, 2008; NETO; CINCOTTO; REPETTE, 2010). Os tubos corrugados cumprem de maneira satisfatória o papel de cessar a saída de água dos corpos de prova, além de permitir a variação dimensional dos corpos de prova.

O uso de revestimento dos corpos de prova prismáticos foi baseado em outros estudos, os quais obtiveram resultados positivos com a utilização de plástico filme e

papel alumínio selados com fita de alumínio (MELO NETO; CINCOTTO; REPETTE, 2008; NETO; CINCOTTO; REPETTE, 2010).

Para o presente estudo, foram avaliados os seguintes revestimentos para os corpos de prova: (a) apenas parafina aplicada com pincel diretamente sobre o corpo de prova, (b) papel alumínio e imersos em parafina, (c) plástico filme e imersos em parafina, (d) plástico filme e papel alumínio, pintados com parafina, e (e) papel alumínio e pintados com parafina. A Figura 25 apresenta os corpos de prova envolvidos com cada tipo de revestimento.



Figura 25 - Tipos de revestimento dos corpos de prova: (a) apenas parafina; (b) com papel alumínio e imersos em parafina; (c) com plástico filme e imersos em parafina; (d) com plástico filme e papel alumínio, pintados com parafina; (e) com papel alumínio pintado com parafina

Inicialmente, percebeu-se que a utilização do plástico filme ou papel alumínio sem parafina acarretariam em corpos de prova com revestimentos muito sensíveis que, por conta do manuseio, poderiam sofrer danos em sua superfície, originando pontos de saída de água. Por isso, essas possibilidades foram descartadas da análise de tipos de revestimentos.

Outra forma utilizada que não teve sucesso foi utilizando a parafina diretamente nos corpos de prova (imersão dos CPs ou pintando-os) (solução (a)). Desta forma, conforme os poros dos corpos de prova eram preenchidos, formavam-se pontos de possível saída de água. Estes, por sua vez, necessitavam de diversas camadas de parafina para serem totalmente preenchidos. Isso fazia com que o revestimento não ficasse uniforme. Outra preocupação em utilizar a parafina diretamente sobre os corpos de prova foi com relação a temperatura na qual a mesma precisava se encontrar para se manter trabalhável para aplicação (sendo seu ponto de fusão na temperatura de aproximadamente 55°C). Isso poderia interferir nas reações de hidratação do cimento de maneira precoce por conta do aquecimento dos corpos de prova. Mesmo esta forma promovendo preocupações, ela mostrou que a maneira mais fácil de revestir com parafina seria pintando o corpo de prova e não imersão o mesmo em recipiente com parafina líquida. Pois, com a imersão, à medida que o corpo de prova era retirado do recipiente, a parafina se descolava em alguns pontos, ficando vulnerável a perda de água para o ambiente.

Diante das análises anteriores, foram avaliadas outras duas situações. Uma utilizou o papel alumínio antes da aplicação da parafina para solucionar os problemas com os poros da argamassa e minimizar efeitos de temperatura (solução (b)). E a outra foi com a utilização de plástico filme antes da parafina, com o mesmo propósito (solução (c)). Ambas apresentaram capacidade de revestir o corpo de prova totalmente, no entanto o papel alumínio, por ser de fácil manuseio e modelagem em torno do corpo de prova se mostrou mais eficiente. Outra análise envolvendo os CPs com plástico filme e papel alumínio em conjunto antes da pintura com parafina também foi avaliada (solução (d)).

Assim, ficaram definidas como melhores opções para revestimento dos corpos de prova, a utilização de papel alumínio com parafina e a utilização de plástico filme com papel alumínio, além da parafina. Como ambas obtiveram aspecto semelhante, optou-se pela opção mais simples, descartando a utilização do plástico filme. Assim, a solução (e) apresentou-se como a solução ideal, com os CPs envolvidos em papel alumínio, seguidos de pintura com parafina.

A medida inicial de variação dimensional foi realizada logo após o revestimento dos corpos de prova com parafina (24 horas após a moldagem). Além disso, as massas dos corpos de prova também foram aferidas ao longo do ensaio para analisar a sua variação até o final dos experimentos.

As variações dimensionais foram aferidas por meio de um aparelho comparador sem nenhuma força externa aplicada (Figura 26). A variação de dimensão foi aferida diariamente até 14 dias, a cada 7 dias até 28 dias e a partir dos 28, a cada 28 dias, coletando nas idades de 56, 84, 112, 140 e 168 dias.



Figura 26 - Aferição da variação dimensional por aparelho comparador

Após a aferição das medidas, os valores foram descontados da medida inicial obtendo-se os valores de retração ou expansão dos corpos de prova. Esses valores foram divididos por 0,25 para obtenção dos resultados em $\mu\text{m}/\text{m}$ ou mm/m , conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005a). A Equação 2 apresenta o cálculo da variação dimensional das amostras:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

ε_i é a medida da variação dimensional. Se resultar em valor negativo indica retração, enquanto positivo expansão (mm/m);

L_i é a leitura efetuada na idade final (mm);

L_0 é a leitura efetuada após a desforma e revestimento do corpo de prova (mm);

i é a idade de leitura.

Já a variação de massa é calculada por meio da Equação 3:

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} * 100 \quad \text{Eq. 3}$$

Onde:

Δm_i é a medida da variação de massa (%);

m_i é a massa na idade final (g);

m_0 é massa após a desforma e revestimento dos corpos de prova (g).

Durante os ensaios, os corpos de prova permaneceram em câmara seca mantendo a temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $50 \pm 5\%$ (Figura 27).



Figura 27 - Posicionamento dos corpos de prova armazenados em câmara seca

Os dispositivos para armazenamento fazem com que os corpos de prova permaneçam com todas as faces livres com pelo menos 1 cm. Além disso, os suportes mantiveram superfície de contato inferior a 1 cm de largura e foram posicionados transversalmente ao eixo dos corpos de prova, mantendo contato em apenas dois pontos.

4.4.3 Ensaio de Retração por secagem

Além do ensaio de retração autógena também foi realizado o ensaio de retração por secagem, o qual também seguiu os padrões estabelecidos pela norma NBR 15261 (ABNT, 2005a). Os procedimentos de moldagem dos corpos de prova, armazenamento, coleta das medidas de retração e tratamento de dados foram os mesmos apresentados na seção 4.4.2. No entanto, a diferença entre esses ensaios foi com relação ao revestimento dos corpos de prova. No ensaio de retração por secagem os corpos de prova não foram revestidos, ficando completamente expostos ao ar em câmara seca com temperatura controlada de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $50 \pm 5\%$ (Figura 28).

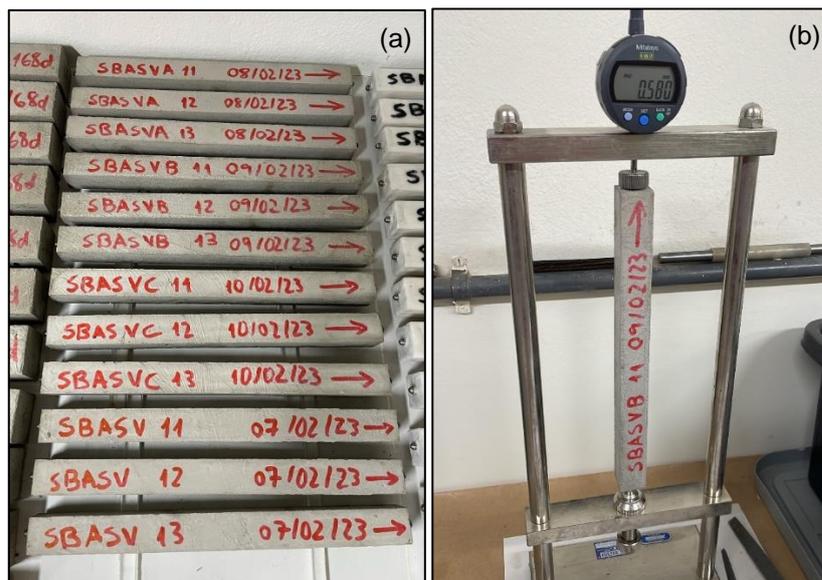


Figura 28 - Ensaio de retração por secagem: (a) CPs armazenados; e (b) aferição da variação dimensional

O não revestimento dos CPs fez com que ocorresse maior perda de água para o ambiente e, conseqüentemente, maiores valores de retração do que os obtidos no ensaio de retração autógena. Assim como no ensaio de retração autógena, nesse ensaio as massas dos corpos de prova foram registradas antes de cada aferição de variação dimensional. Isso permitiu a análise da variação de massa e comparação entre os ensaios de retração autógena e por secagem. As datas de coletas de variação dimensional também seguiram as propostas na seção 4.4.2, todos os dias nos primeiros 14 dias, a cada 7 dias até 28 dias e a cada 28 dias até 168 dias de ensaio.

4.5 Propriedades físico-mecânicas

Foram realizados ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão baseados na NBR 13279 (ABNT, 2005b). Os corpos de prova foram rompidos nas idades de 7, 14, 28, 84 e 168 dias. Foram moldados três corpos de prova de cada traço para cada idade. As dimensões dos corpos de prova prismáticos foram de 4 cm x 4 cm x 16 cm, conforme o molde da Figura 29a. A mistura dos traços foi realizada de acordo com o procedimento da seção 4.2.2. Após o processo de mistura, a

argamassa foi transportada para os moldes (em duas camadas adensadas) untados previamente com óleo mineral desmoldante.



Figura 29 - Moldagem de corpos de prova para ensaios mecânicos: (a) molde com argamassa antes do adensamento; (b) equipamento para adensamento; (c) molde com argamassa após adensamento; e (d) corpos de prova após rasamento

Cada camada foi adensada por mesa de adensamento (Figura 29b), a qual permite a programação de 30 golpes de mesma intensidade, conferindo a padronização estipulada pela norma que rege os ensaios (ABNT, 2005b). Em seguida, os corpos de provas foram rasados com régua metálica (Figura 29d), cobertos com plástico filme e levados à câmara seca onde permaneceram por 48 horas para o processo de cura inicial (temperatura de 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$), conforme a Figura 30a.

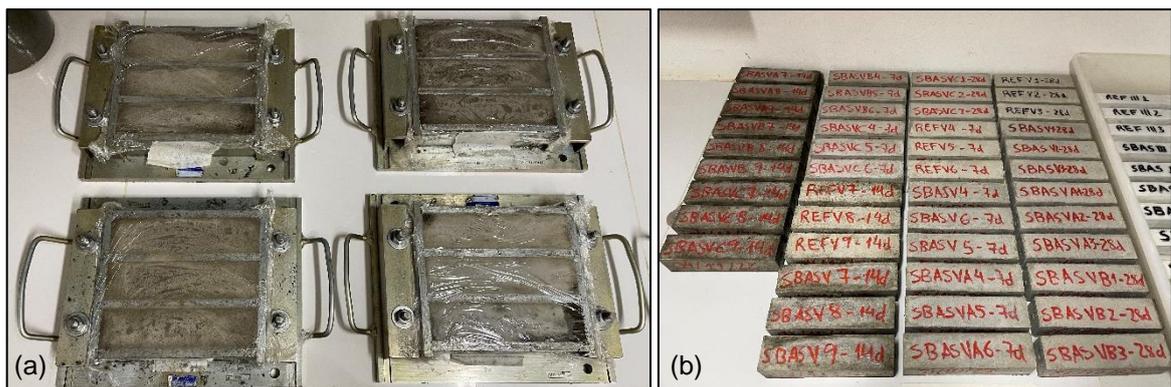


Figura 30 - Corpos de prova após moldagem (a) e armazenados até a data de ruptura (b)

Finalmente, após 48 horas, os corpos de prova foram desmoldados e permaneceram em ambiente laboratorial a 23 ± 2 °C e umidade relativa do ar de $60 \pm 5\%$, até as datas de rompimento (Figura 30b).

4.5.1 Ensaio de resistência à tração na flexão

Para obtenção dos resultados de resistência à tração na flexão, os corpos de prova foram posicionados no sistema de aplicação de carga de forma com que a face rasada não ficasse em contato com os dispositivos de apoio, nem com o dispositivo de carga. Após o posicionamento do corpo de prova, foi aplicada carga de 50 ± 10 N/s até a ruptura. A prensa utilizada foi da marca EMIC, modelo GR044, possuindo célula de carga com capacidade máxima de 600 kN. A Figura 31 apresenta um corpo de prova durante o ensaio de resistência à tração na flexão (a) e após o rompimento do corpo de prova (b).



Figura 31 - Ensaio de resistência à tração na flexão: (a) ensaio em andamento; e (b) CP após rompimento

Para o cálculo da resistência à tração na flexão, foi utilizada a Equação 4:

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

R_f é a resistência à tração na flexão (N/mm² ou MPa);

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do corpo de prova (N);

L é a distância entre os suportes (mm).

4.5.2 Ensaio de resistência à compressão

Após o rompimento dos corpos de prova para o cálculo da resistência à tração na flexão, as metades dos corpos de prova foram utilizadas para o ensaio de resistência à compressão (Figura 32), totalizando 6 amostras para cada traço em cada idade.



Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão: (a) após rompimento na célula de carga; e (b) CPs ensaiados

Cada metade foi posicionada de modo que a face rasada não ficasse em contato com o dispositivo de apoio e nem com o dispositivo de carga, da mesma forma que foi realizada no ensaio de tração na flexão. Para este ensaio foi aplicada a carga

de 500 ± 50 N/s até a ruptura do corpo de prova. O cálculo de resistência à compressão foi realizado baseando-se na Equação 5:

$$f_c = \frac{F_c}{1600} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão (N/mm² ou MPa);

F_c é a carga máxima aplicada (N);

1600 é a área da seção considerada quadrada de 40 mm por 40 mm (mm²).

4.5.3 Microscopia óptica das amostras rompidas

A porosidade dos compósitos cimentícios endurecidos foi avaliada por meio de microscopia óptica e tratamento de imagens, utilizando o *software ImageJ*. O intuito desse procedimento foi observar a variação da porosidade entre idades iniciais e idades avançadas. As superfícies rompidas das amostras com a idade de 168 dias foram analisadas por meio de microscópio óptico com ampliação de 1000x. Essa análise permitiu apontar possíveis diferenças entre as microestruturas dos compósitos modificados com distintos polímeros superabsorventes.

4.6 Análise estatística

Para averiguar se houve diferença estatística significativa entre os resultados obtidos para os diferentes traços, foram realizadas análises de variância (ANOVA) e Teste de Tuckey para todos os resultados experimentais. O tratamento estatístico foi realizado por meio do *software* livre *PART*. Foi considerado um nível de significância α de 5%, e com isso, os resultados forneceram 95% de confiança.

5. Resultados e discussão

Neste capítulo estão apresentados os resultados da pesquisa, decorrentes do programa experimental proposto.

5.1 Capacidade de absorção dos PSAs

A Figura 33 apresenta os resultados provenientes do ensaio de capacidade de absorção dos polímeros superabsorventes, realizado pelo método gravimétrico *tea-bag* em água deionizada.

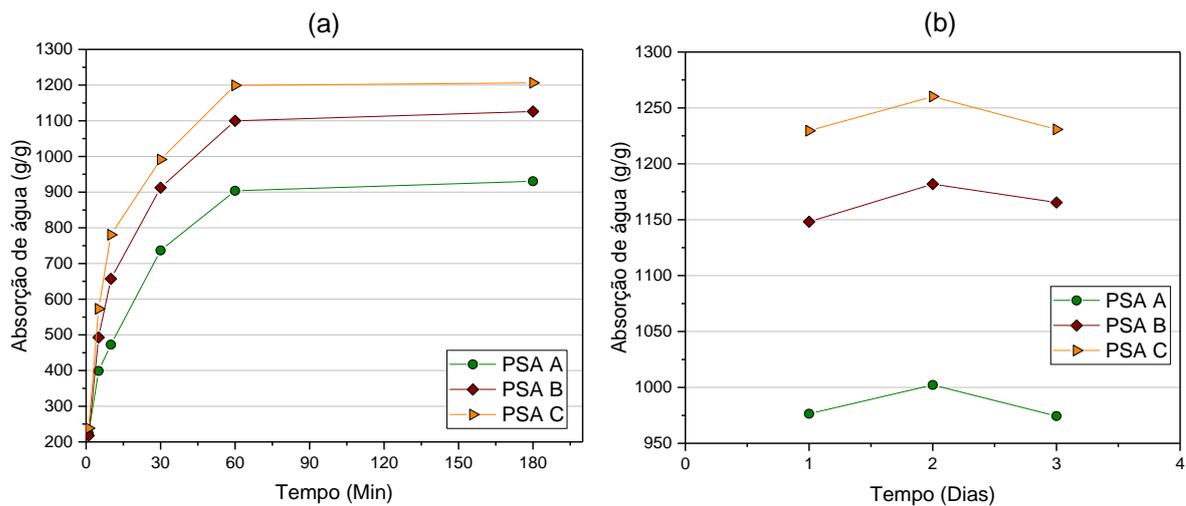


Figura 33 - Capacidade de absorção dos PSA em contato com água deionizada: (a) de 0 até 180 minutos e (b) de 1 a 3 dias

Por meio desses resultados foi possível notar que o polímero superabsorvente C possui maior capacidade de absorção, seguido do PSA B e PSA A. Essa ordem seguiu os valores disponibilizados pelo fabricante dos polímeros, apontados na seção 4.1.4 do presente estudo. A diferença entre os valores obtidos e os disponibilizados pelos fabricantes está atrelada ao método de ensaio, no qual o fabricante utilizou 5%

de cimento Portland CEM I junto a solução. E a concentração da solução é afetada dependendo da quantidade de íons de cálcio (Ca^{2+}), fazendo com que a presença de cimento na solução exerça influência sobre o comportamento de absorção e dessorção do PSA (SCHRÖFL; MECHTCHERINE; GORGES, 2012). O aumento da absorção de água entre a primeira medição e após três dias de ensaio foi de 335,78%, 435,08% e 416,71% dos PSAs A, B e C, respectivamente. E a diferença entre a absorção do PSA com maior capacidade de absorção dos demais foi de 26,31% para o PSA de menor capacidade de absorção e 5,61% do PSA de capacidade de absorção intermediária.

As diferentes capacidades de absorção averiguadas neste ensaio justificam a necessidade da utilização de quantidades distintas de água adicional nos traços, conforme o tipo de PSA utilizado, para manutenção do índice de consistência pré-estabelecido, o qual será discutido na seção subsequente.

5.2 Consistências das argamassas no estado fresco

A Tabela 12 apresenta os resultados de índice de consistência para cada traço utilizado no presente estudo.

Nota-se que os índices de consistência apresentados permaneceram entre os estabelecidos na seção 4.2.1 para ambos os traços, mesmo com a utilização de diferentes tipos de cimento e PSAs. Isso foi possível por conta do ajuste das quantidades de água adicionais aos traços, uma vez que, por utilizar diferentes tipos de PSA, cada traço apresentou diferentes capacidades de absorção de água.

A adoção por manter a consistência foi com o intuito de avaliar o comportamento de cada polímero superabsorvente nas matrizes cimentícias e evitar o excesso de água devido a padronização de uma determinada quantidade de água idêntica para todos os traços. Outros autores também apontaram a eficiência da adição de água além da quantidade padrão da mistura a fim de manter a trabalhabilidade das misturas (MECHTCHERINE *et al.*, 2014; SCHROEFL *et al.*, 2015; SNOECK *et al.*, 2014)

Tabela 12 - Índice de consistência das argamassas com diferentes PSAs

	Traço	Índice de consistência (mm)
REF	V	239 ± 1
	III	243 ± 1
ACBC	V	234 ± 1
	VA	229 ± 1
	VB	228 ± 1
	VC	230 ± 1
	III	240 ± 1
	IIIA	234 ± 1
	IIIB	231 ± 1
	IIIC	236 ± 1

Notou-se também que os traços com cimento CP III possuem maior trabalhabilidade em relação aos traços com cimento CP V ARI. Isso se deve às reações de hidratação mais lentas do cimento CP III devido ao tamanho de partículas inferior em comparação ao cimento CP V ARI, o qual é um cimento destinado a proporcionar alta resistência inicial e, por isso, desencadeia reações mais aceleradas. Essa alta resistência inicial se deve ao processo de moagem mais intenso que o cimento CP V ARI sofre durante sua fabricação, resultando em partículas mais finas do que o cimento CP III.

A diferença entre os tipos de cimento e a adição de polímeros superabsorventes também pode afetar os tempos de pega e, por isso, esse parâmetro também foi avaliado e os resultados estão apresentados na seção seguinte.

5.3 Tempos de pega

A Figura 34 apresenta os resultados dos tempos de pega dos traços com cimento CP V ARI e CP III. As colunas estão sobrepostas, com a parte amarela representando o tempo de pega inicial, enquanto a parte alaranjada representa o restante do tempo até que os traços atingiram o tempo de pega final.

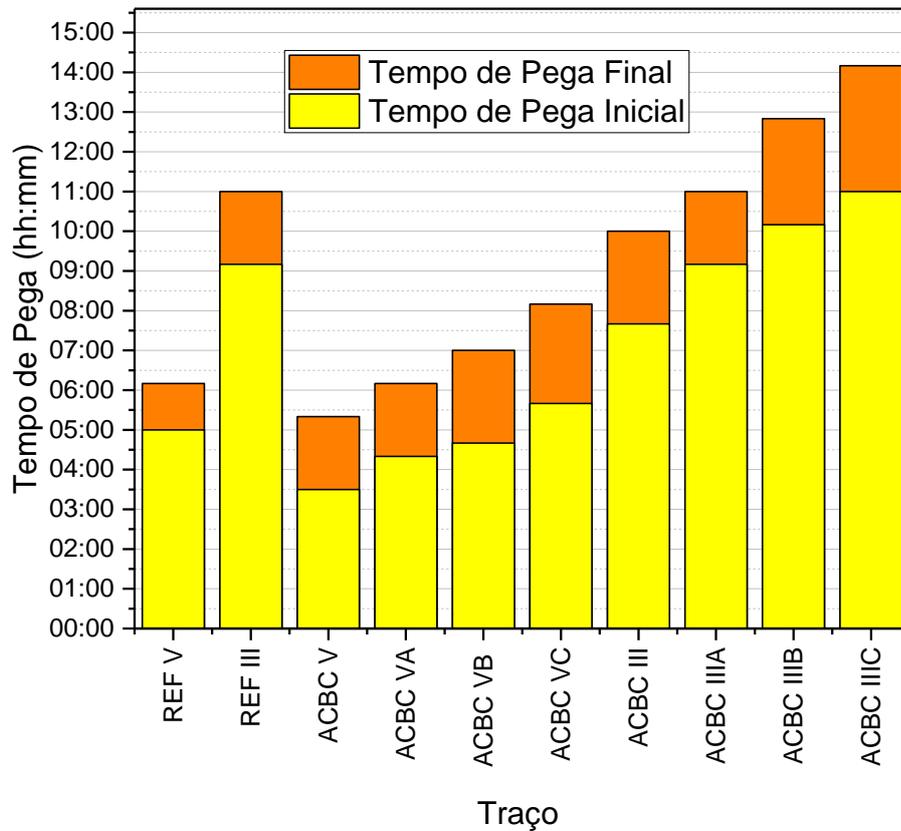


Figura 34 - Tempos de pega dos traços com cimento CP V ARI e CP III

Com base nesses resultados notou-se que para os dois cimentos o traço ACBC sem a adição de polímeros superabsorventes apresentou tempo de pega inicial e final inferior ao traço de referência. No entanto, ao adicionar os PSAs aos traços os tempos de pega foram superiores ao traço com ACBC sem polímeros. Isso se deve a maior quantidade de água utilizada nessas misturas, uma vez que, os polímeros superabsorventes necessitam de água adicional para exercerem sua função de

reservatório de água para atuar como agente de cura interna. De Meyst e outros (2021) também apontaram atraso no tempo de pega de traços contendo polímeros superabsorventes. Quanto maior a quantidade de PSAs utilizada nas misturas, maior o tempo de pega final (DE MEYST *et al.*, 2021).

Comparando o comportamento dos dois tipos de cimentos, percebeu-se que o traço com o cimento CP V ARI apresentou tempos de pega inferiores aos traços com cimento CP III. Esse efeito pode ser justificado pelas reações de hidratação do cimento em questão serem mais rápidas por conta de ser material destinado a atingir altas resistências em sua fase inicial de hidratação, decorrente do grau de moagem pelo qual foi submetido em sua fabricação.

Essa diferença nos tempos de pega pode desencadear comportamentos distintos durante o ensaio de retração plástica, visto que o mesmo é executado com as misturas no estado fresco. Os resultados desse ensaio serão apresentados e discutidos a seguir.

5.4 Retração plástica

5.4.1 Cimento CP V ARI

A Figura 35 apresenta o levantamento de imagens proveniente do ensaio de retração plástica, dos corpos de prova moldados com cimento CP V ARI, os quais ficaram em estufa (40 ± 3 °C e UR de $15 \pm 10\%$) por 24 horas logo após a moldagem, ou seja, em estado fresco.

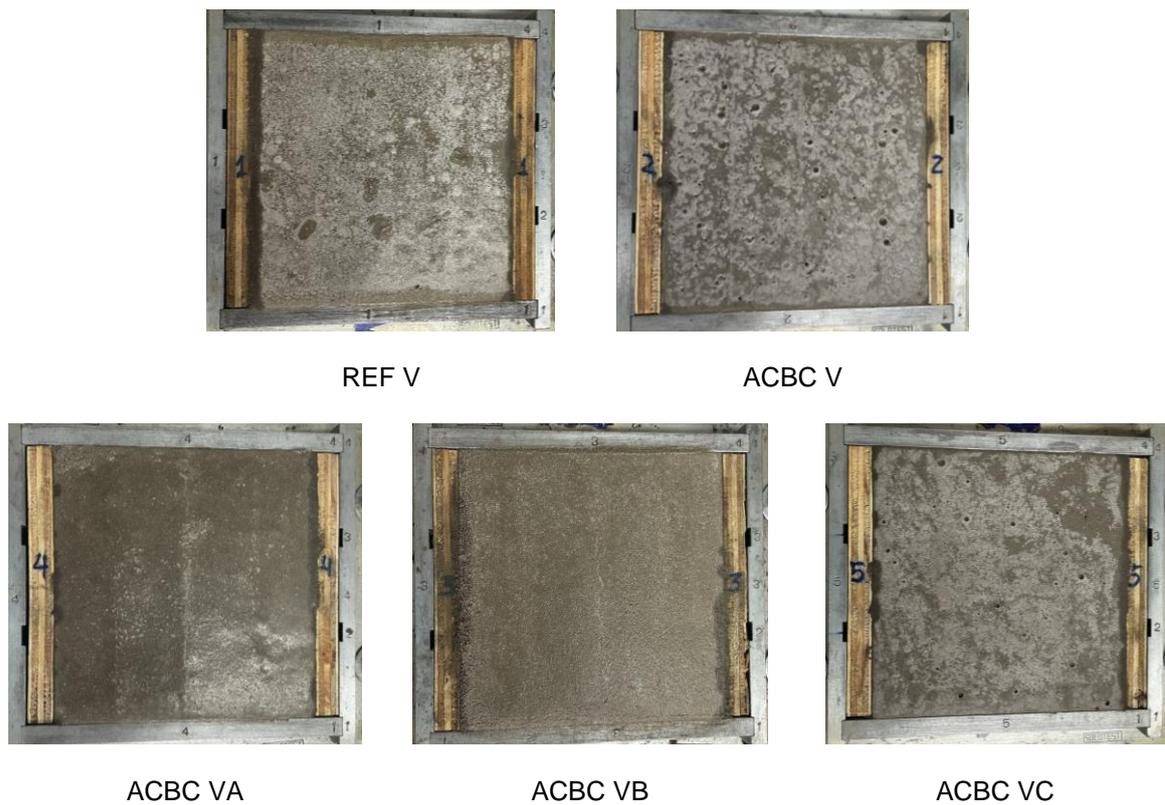
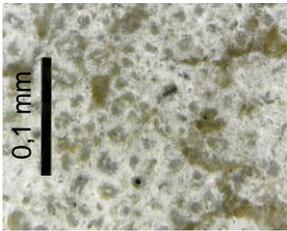
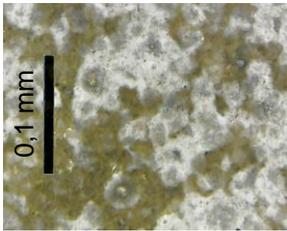
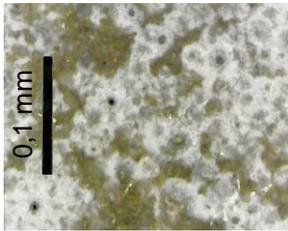
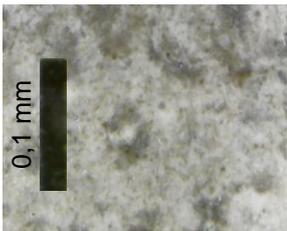
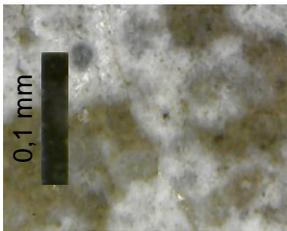
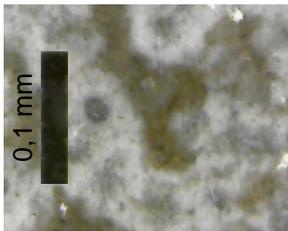
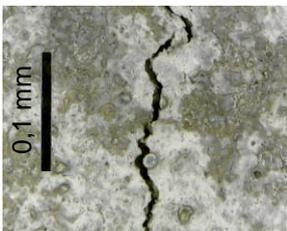
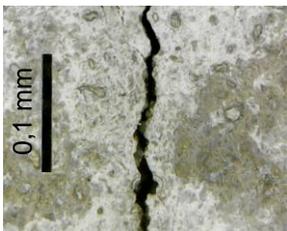
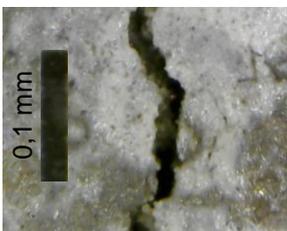
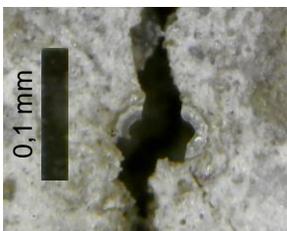
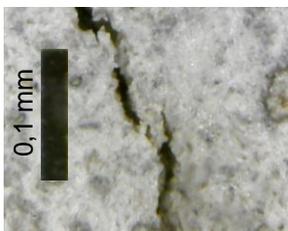


Figura 35 - Corpos de Prova após 24h no ensaio de retração plástica - CP V

Por meio dessas imagens foi possível notar pequenos vazios superficiais nos corpos de prova contendo ACBC, principalmente na parte central dos corpos de prova. No entanto, a fim de comparar a dimensão das fissuras oriundas de cada traço foi necessária uma análise aprofundada dos CPs por meio de microscopia óptica e aferição das fissuras, utilizando o *software ImageJ*. A amplificação em 100 e 1000 vezes permitiu melhor interpretação dos resultados do ensaio. A Tabela 13 apresenta as microscopias dos traços REF V e ACBC V.

Tabela 13 - Microscopias dos traços REF V e ACBC V em três pontos (100x e 1000x)

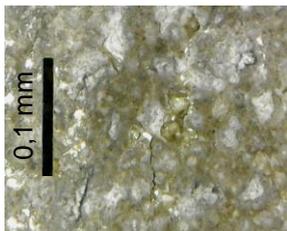
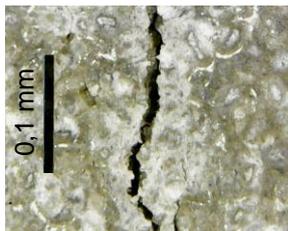
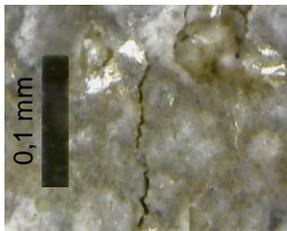
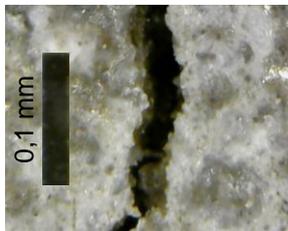
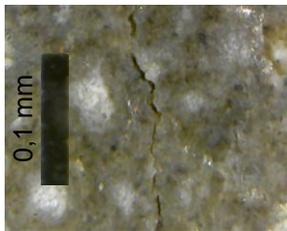
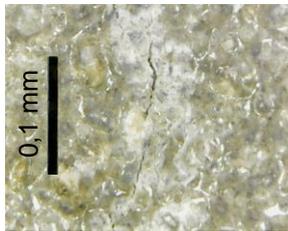
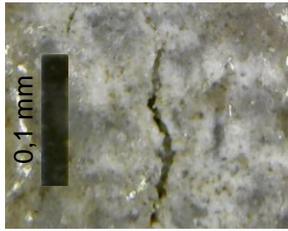
Traço	Zoom	Lado esquerdo	Centro	Lado Direito
REF V	100x			
	1000x			
ACBC V	100x			
	1000x			

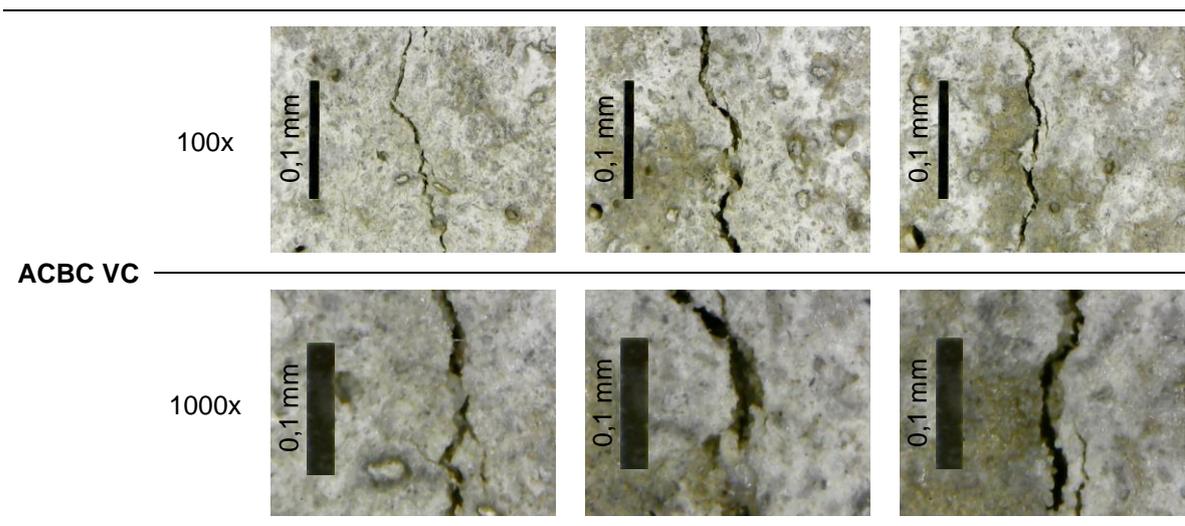
Por meio dessas imagens foi possível notar que a ACBC promoveu fissuras em decorrência da retração plástica no traço ACBC V. Além disso, notou-se que ocorreram fissuras nos três pontos estudados do CP, no lado esquerdo, na porção central e no lado direito. O agravamento dos efeitos de retração plástica pode ser atribuído à densificação da matriz cimentícia, promovida pelo agregado-resíduo (ACBC) por ter dimensões inferiores aos agregados naturais do traço de referência (conforme apresentado na seção: programa experimental), bem como pelo melhor empacotamento das partículas. Uma matriz mais densa promove maiores efeitos de capilaridade, os quais fazem com que a água seja expulsa com mais facilidade dos

corpos de prova, principalmente quando expostos a altas temperaturas (acima de 36°C) e correntes de ar nas primeiras horas após o contato inicial com a água de amassamento.

Visto que foi observada a incidência de fissuras no traço com ACBC, foi realizada a adição dos três PSAs com diferentes capacidades de absorção a fim de avaliar o seu comportamento ao longo do ensaio de retração plástica. A Tabela 14 apresenta as microscopias dos traços ACBC com a utilização dos polímeros superabsorventes A, B e C.

Tabela 14 - Relatório de microscopia óptica dos traços ACBC VA, ACBC VB e ACBC VC em três pontos (100x e 1000x)

Traço	Zoom	Lado esquerdo	Centro	Lado Direito
ACBC VA	100x			
	1000x			
ACBC VB	100x			
	1000x			



Com base nesses resultados, observou-se que todos os traços contendo polímeros superabsorventes apresentaram fissuras menos espessas do que o traço sem polímeros da Tabela 13. As dimensões das fissuras serão apresentadas e discutidas mais adiante.

Notou-se também que o polímero com maior efetividade foi o PSA-B, pois apresentou fissuras de menor dimensão em comparação aos outros traços. O que também corroborou com essa afirmação foi o não aparecimento de fissuras nos lados esquerdo e direito do CP, apenas na parte central. Os traços ACBC VA e ACBC VC apresentaram fissuras nos lados esquerdo e direito, porém, menos espessas do que as fissuras da porção central do CP. Esse efeito foi proporcionado por conta da maior distância da borda do CP até o centro do que da borda até os pontos de indução de fissuras laterais. Assim, as hastes embutidas no centro dos corpos de prova tiveram um menor confinamento em decorrência da maior distância das laterais, viabilizando maiores aberturas na argamassa.

A fim de aprofundar a análise da retração plástica também foram aferidas as espessuras das fissuras proporcionadas pelo ensaio. Foram realizadas três medidas da porção central dos corpos de prova, região na qual foi obtida maior incidência de fissuras. A opção pela porção central dos corpos de prova foi para evitar grande influência das laterais na qual, em algumas situações, não foi observado o

aparecimento de fissuras. A Figura 36 apresenta as espessuras médias e desvios padrões das fissuras de cada traço.

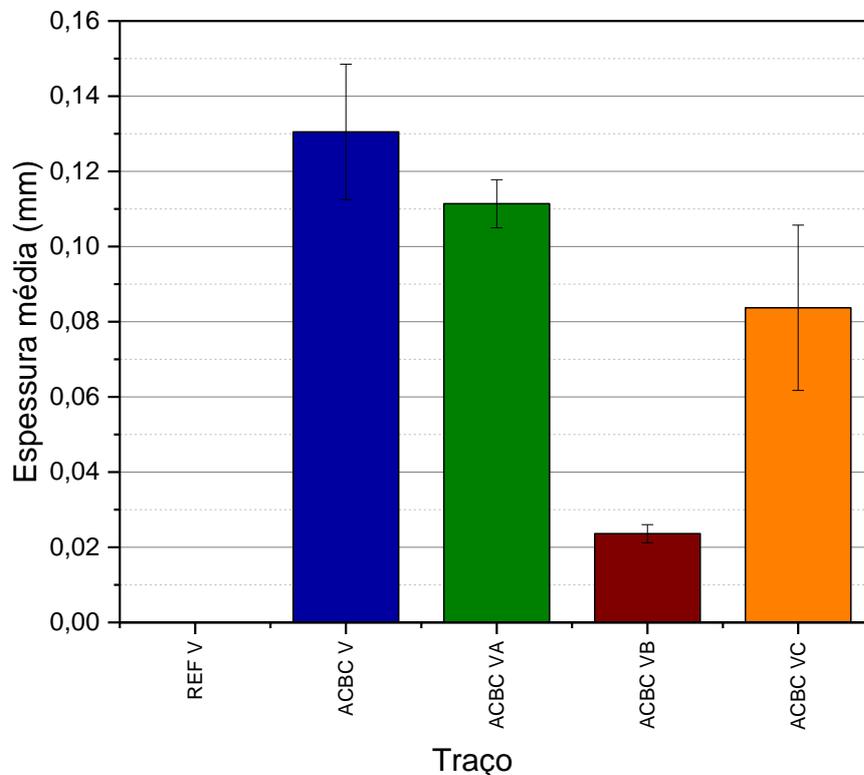


Figura 36 - Espessuras médias e desvios padrões das fissuras de cada traço (CP V ARI)

Com base nos resultados, notou-se que, como comentado na interpretação das imagens, o traço contendo ACBC proporcionou o aparecimento de fissuras mensuráveis com a ampliação de 1000x, enquanto o traço referência não. Esse fator pode estar atrelado a densificação da matriz cimentícia por conta da maior quantidade de finos proporcionada pela presença de ACBC.

No entanto, com a aplicação dos PSA houve redução da retração plástica na ordem de 14,64% para o traço ACBC VA, 81,92% para o ACBC VB e 35,86% para o ACBC VC, considerando essa redução em comparação ao traço ACBC V. Dessa forma, notou-se que o PSA com melhor desempenho frente à retração plástica foi o PSA-B, seguido do A e, por fim o C. Vale destacar que todos os traços apresentaram espessuras de fissuras de no máximo 0,031 mm acima de 0,1 mm, podendo ser

necessário o aprofundamento desse estudo, utilizando diferentes relações a/c a fim de induzir fissuras mais pronunciadas. A redução da retração plástica e, conseqüentemente, fissuras nas argamassas/concretos também foi observada por outros autores (BOSHOFF *et al.*, 2020; SCHRÖFL *et al.*, 2022; YAO; ZHU; YANG, 2012).

Além do relatório de microscopias, também foi realizado o controle da variação de massa, o qual tem seus resultados apresentados na Figura 37.

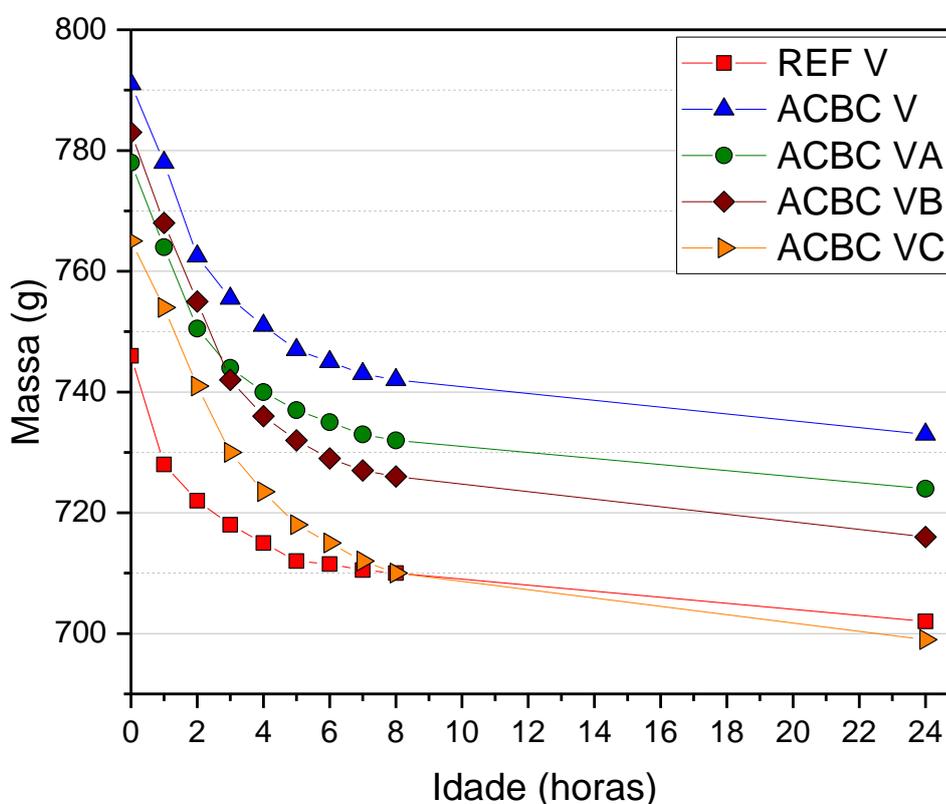


Figura 37 - Evolução das massas dos CPs ao longo do ensaio de retração plástica - CP V

Com base na evolução das massas, como esperado, percebeu-se uma diminuição das massas ao longo do ensaio de retração plástica, tendo as amostras ACBC VB e ACBC VC apresentando maiores diminuições (8,56% e 8,63%, respectivamente) nas massas ao final do período de 24 horas. Esse resultado está atrelado a maior quantidade de água de amassamento e sua evaporação nesses traços. O restante dos traços apresentou redução de 5,90% (REF V), 7,33% (ACBC

V) e 6,94% (ACBC VA). No entanto, todos os traços apresentaram comportamentos semelhantes no quesito curvas de evolução de massa, iniciando o ensaio com uma redução maior entre o primeiro contato com água e a primeira hora (de até 2,41%), com uma queda progressiva nesse valor. Entre 8 horas e 24 horas houve novamente um aumento da redução por conta do maior intervalo de leitura (16 horas), reduzindo até 1,55% da massa neste período. Tendo em vista os valores de redução percentual das massas, foi possível analisar graficamente a relação entre eles e a relação água/cimento total das misturas contendo ACBC em sua composição (Figura 38).

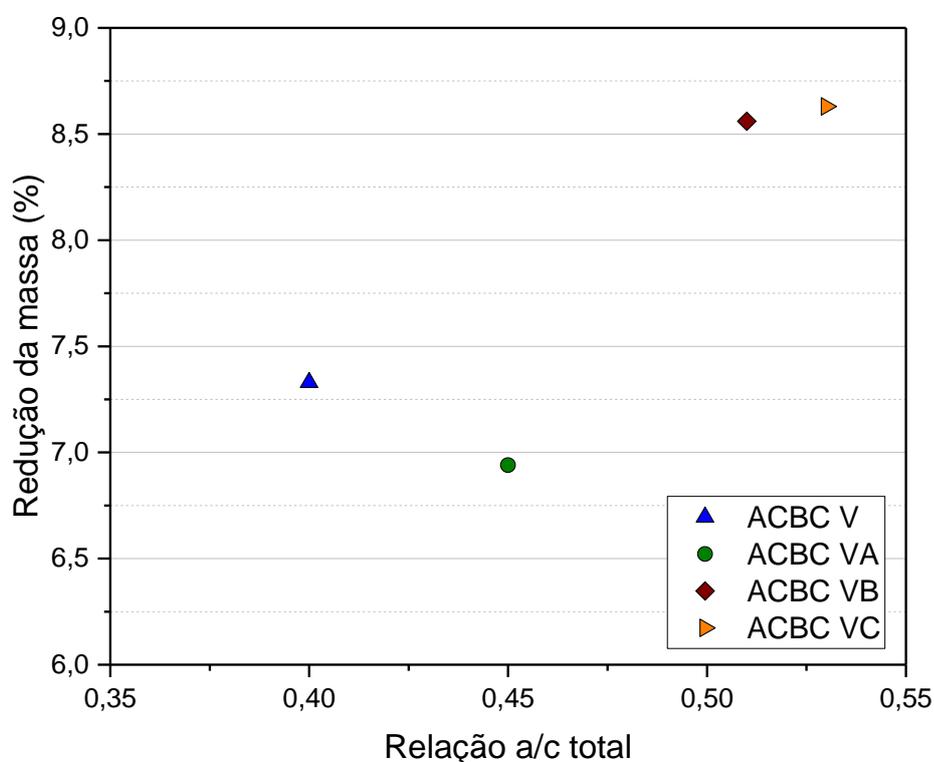


Figura 38 - Relação entre a redução de massa (%) e a relação a/c tot. das misturas ao longo do ensaio de retração plástica - CP V ARI

Observando os percentuais de redução relacionados à relação a/c total, notou-se que apesar do traço ACBC VA de possuir maior quantidade de água na mistura em relação ao traço ACBC V (relação a/c tot. = 0,45 frente à 0,40), o traço ACBC VA apresentou redução da massa inferior. Isso mostra a capacidade do PSA em reter certa quantidade de água durante o processo de endurecimento da argamassa. O

mesmo não pôde ser observado com os PSAs B e C, muito por conta da quantidade mais expressiva de água total presente nas misturas (0,51 e 0,53, respectivamente). Destaca-se que o ensaio é realizado em estufa, com os corpos de prova expostos a temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa $15 \pm 10\%$, o que facilita a perda de água para o ambiente.

Apesar dos traços ACBC VB e ACBC VC terem apresentado maior redução de massa ao longo do ensaio, notou-se anteriormente que esses corpos de prova apresentaram as menores espessuras médias de fissuras. Esse efeito pode estar atrelado a maior quantidade de água disponível a ser perdida ao ambiente antes que os efeitos de retração plástica (no estado fresco) comecem a ser observados. Além disso, é possível que os PSAs auxiliem também na auto vedação e auto cicatrização das fissuras ainda no estado fresco das misturas, como observado por outros autores (CRAEYE; GEIRNAERT; SCHUTTER, 2011; HONG; CHOI, 2017; LEE; WONG; BUENFELD, 2010; SCHRÖFL *et al.*, 2022).

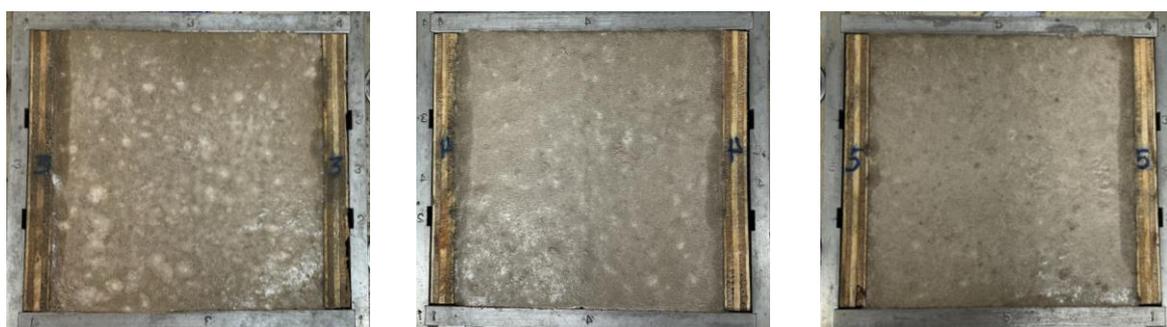
5.4.2 Cimento CP III

Esse mesmo ensaio também foi realizado utilizando traços com o cimento CP III. A Figura 39 apresenta o levantamento de imagens proveniente do ensaio de retração plástica, no qual os corpos de prova moldados com cimento CP III foram armazenados em estufa ($40 \pm 3^{\circ}\text{C}$ e UR de $15 \pm 10\%$) por 24 horas logo após a moldagem.



REF III

ACBC III



ACBC IIIA

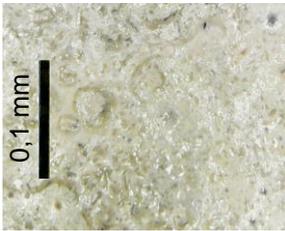
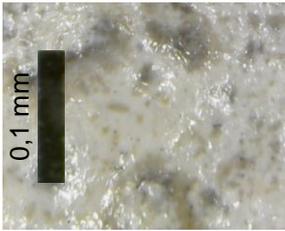
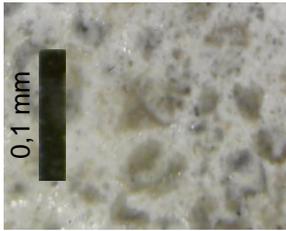
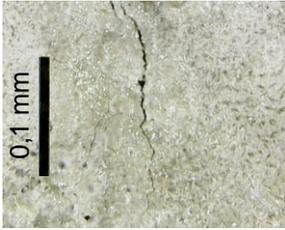
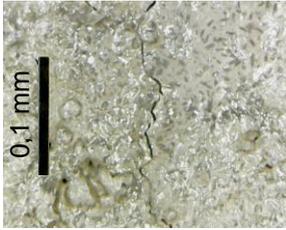
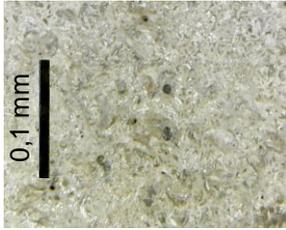
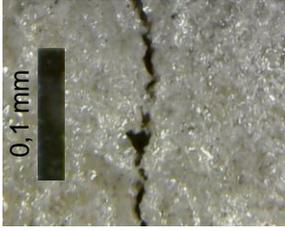
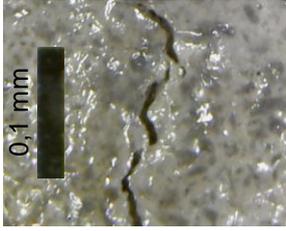
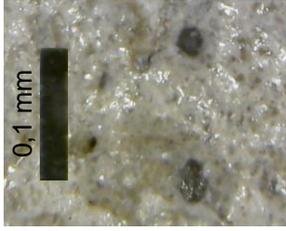
ACBC IIIB

ACBC IIIC

Figura 39 - Corpos de Prova após 24h no ensaio de retração plástica - CP III

Diferentemente do ensaio realizado com os corpos de prova moldados com CP V ARI, nesse ensaio a visualização de fissuras a olho nu por imagens no tamanho real ficou comprometida, por isso, fez-se necessária uma análise por meio das microscopias ópticas com ampliação de 100 e 1000 vezes. Nesse procedimento também foram feitas imagens no lado esquerdo, direito e porção central dos corpos de prova, em um mesmo alinhamento, com o intuito de padronizar a medição. A Tabela 15 apresenta as microscopias dos traços REF III e ACBC III.

Tabela 15 - Microscopias dos traços REF III e ACBC III em três pontos (100x e 1000x)

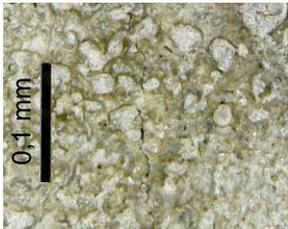
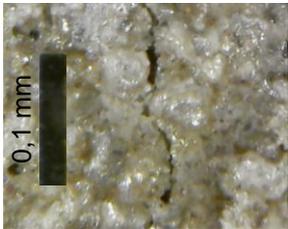
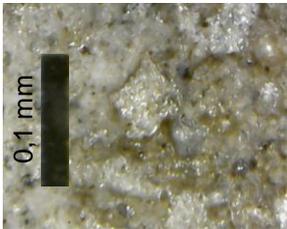
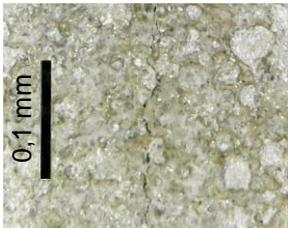
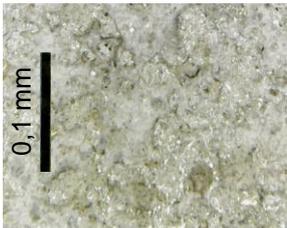
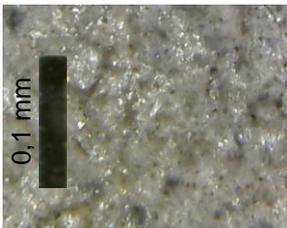
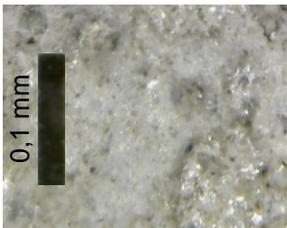
Traço	Zoom	Lado esquerdo	Centro	Lado Direito
REF III	100x			
	1000x			
ACBC III	100x			
	1000x			

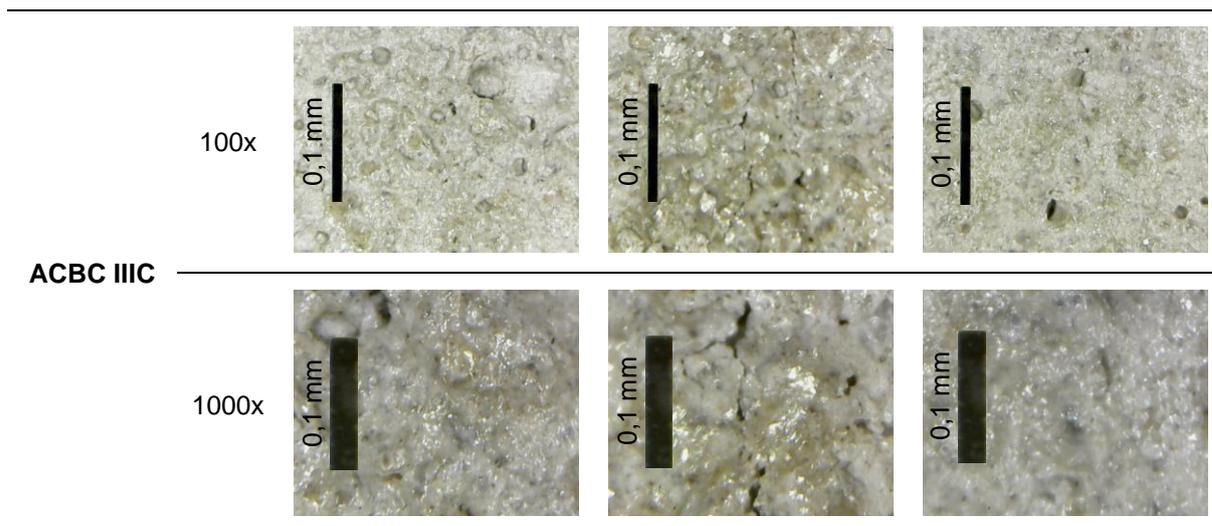
Por meio dessas imagens foi possível notar que, no traço com CP III, ACBC também agravou os efeitos da retração plástica (ACBC III) se comparado ao traço de referência (sem ACBC e PSA). Assim como no ensaio com cimento CP V ARI, utilizando o CP III o corpo de prova referência não apresentou fissuração visível, mesmo com ampliação de 1000x, pela análise microscópica. Ademais, tendo em vista que no lado direito do CP ACBC III não foi possível visualizar fissuração, notou-se que os efeitos da retração plástica são mais notáveis quando utilizado cimento CP V ARI na moldagem dos CPs. Esse efeito pode ser proveniente pela maior velocidade de

reações na fase inicial da mistura com CP V ARI para obtenção da alta resistência inicial, se comparado ao CP III.

Mesmo obtendo fissuras menos espessas com a utilização do cimento CP III, a aplicação dos polímeros superabsorventes foi avaliada para análise de sua efetividade na minimização da retração plástica. A Tabela 16 apresenta as microscopias dos traços ACBC com a utilização dos polímeros superabsorventes A, B e C e cimento CP III.

Tabela 16 - Microscopias dos traços ACBC IIIA, ACBC IIIB e ACBC IIIC em três pontos (100x e 1000x)

Traço	Zoom	Lado esquerdo	Centro	Lado Direito
ACBC IIIA	100x			
	1000x			
ACBC IIIB	100x			
	1000x			



Inicialmente, foi possível notar que em nenhum dos traços com polímeros superabsorventes surgiram fissuras nas laterais dos CPs, comprovando a eficiência desses materiais também em matrizes cimentícias ecoeficientes (com CP III). Já na porção central dos corpos de prova, houve fissuração, no entanto, menos pronunciada do que na amostra sem a utilização dos PSAs, mais uma vez, evidenciando os efeitos positivos contra as consequências da retração plástica.

Como realizado para o cimento CP V ARI, também foram aferidas as espessuras das fissuras proporcionadas pelo ensaio com o intuito de aprofundar a análise dos resultados do ensaio de retração plástica. A Figura 40 apresenta a média das espessuras da porção central dos corpos de prova e seus respectivos desvios padrões.

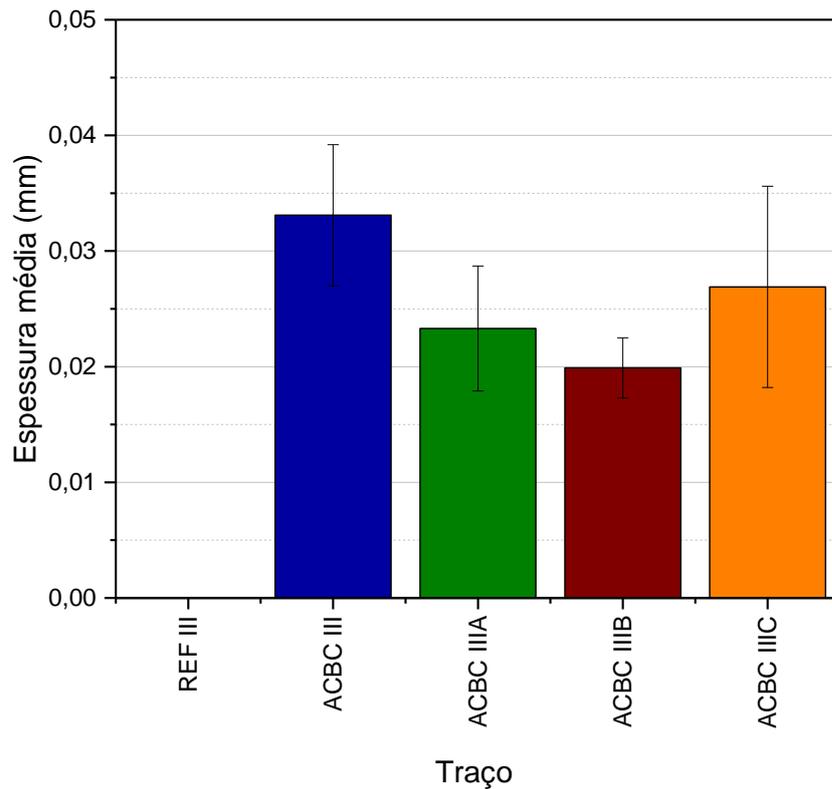


Figura 40 - Espessuras médias e desvios padrões das fissuras de cada traço (CP III)

Tendo em vista os resultados obtidos, foi possível notar a redução da retração plástica por parte dos traços com PSA em comparação ao traço com ACBC e sem PSA, visto que proporcionaram fissuras menos espessas do que o traço ACBC III. Outros pesquisadores também apontaram a presença do PSA como redutor da presença de fissuras em ensaios de retração plástica (BOSHOF *et al.*, 2020). O PSA com melhor resultado nesse quesito foi novamente o PSA-B, com redução de 39,88%, seguido do PSA-A, o qual reduziu em 29,61%, e por último o PSA-C com redução de 18,73%. A redução da retração plástica pelos PSA não tão pronunciada pode estar atrelada a dimensão das fissuras que se mantiveram abaixo de 0,05 mm.

Além das imagens, para os traços moldados com cimento CP III também foi realizado controle da variação de massa, o qual tem seus resultados apresentados na Figura 41.

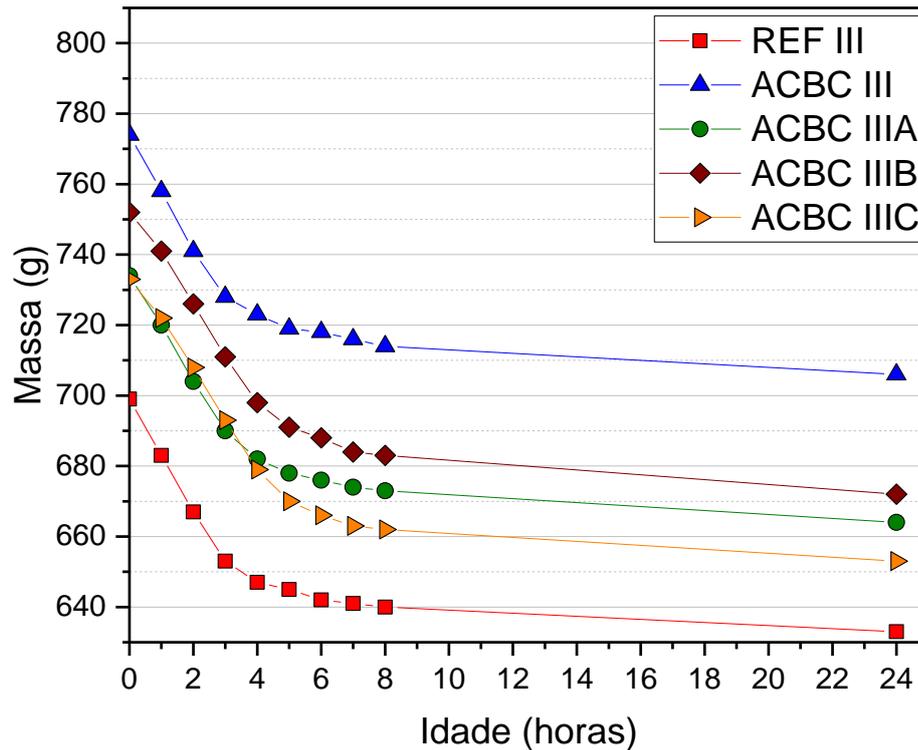


Figura 41 - Evolução das massas dos CPs ao longo do ensaio de retração plástica - CP III

Com base nesses resultados percebeu-se também uma diminuição das massas ao longo do ensaio de retração plástica, tendo as amostras com PSA apresentado maiores diminuições nas massas ao final do período de 24 horas, por conta da maior quantidade de água de amassamento e, conseqüentemente, taxa de evaporação mais elevada. O traço REF III apresentou redução na massa de 9,44%. Por outro lado, os traços contendo ACBC apresentaram reduções de 8,79%, 9,54%, 10,64% e 10,91% (segundo a ordem ACBC III, ACBC IIIA, ACBC IIIB e ACBC IIIC). Analisando a evolução das massas, todos apresentaram comportamentos semelhantes, iniciando o ensaio com maior redução entre o primeiro contato com água e a primeira hora (redução de até 2,89% nesse período), com uma queda progressiva nesse valor. Entre 8 horas e 24 horas, assim como nos traços com cimento CP V ARI, também houve um aumento da redução por conta do maior intervalo de leitura (16 horas), alcançando até 2,11% de redução. A fim de aprofundar o entendimento relacionado à evolução das massas ao longo do ensaio de retração plástica dos traços contendo ACBC, a Figura 42 apresenta a relação entre a água total e a redução percentual da massa ao longo do ensaio dos CPs contendo ACBC.

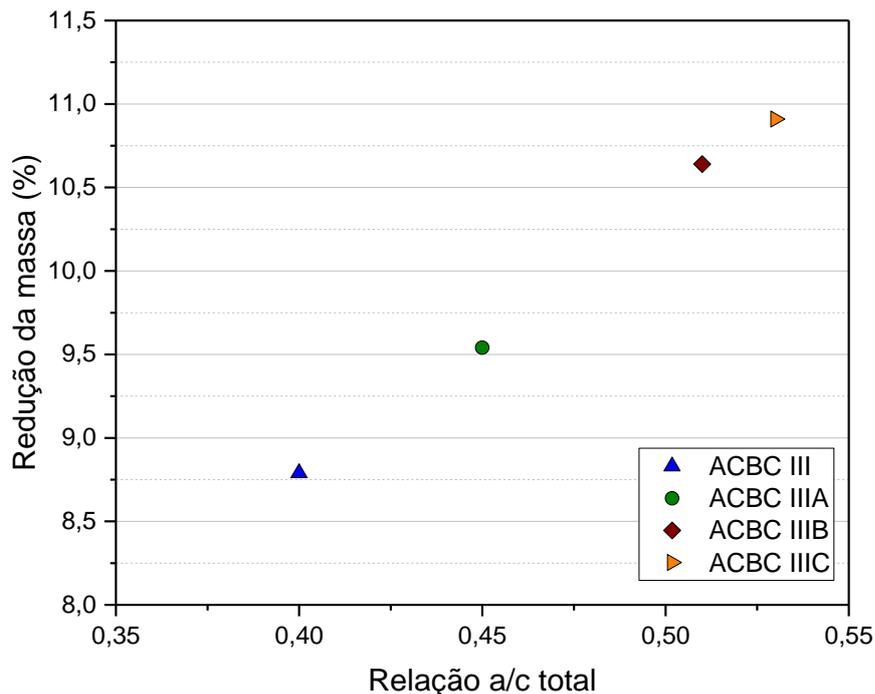


Figura 42 - Relação entre a redução de massa (%) e a relação a/c tot. das misturas ao longo do ensaio de retração plástica - CP III

Com base nesta análise gráfica, fica clara a maior redução de massa conforme aumenta-se a quantidade de água disponível. A situação na qual os corpos de prova são expostos fazem com que ocorra essa perda de água de amassamento diretamente proporcional à quantidade de água total disponível para cada mistura.

Apesar dos traços contendo PSA apresentarem maior redução da massa ao longo do ensaio, todos apresentaram espessuras médias de fissuras inferiores ao traço contendo apenas ACBC, sem PSA. Esse efeito pode estar atrelado a maior quantidade de água disponível ao longo do tempo de ensaio, o que faz com que as reações de hidratação ocorram de maneira mais lenta, minimizando a propensão para ocorrência de fissuras de maneira precoce. Além disso, também pode-se atrelar esses resultados ao efeito de auto vedação e auto cicatrização das fissuras promovido pelos PSAs com as argamassas ainda no estado fresco, também apontado por outros pesquisadores (CHINDASIRIPHAN; YOKOTA; PIMPAKAN, 2020; HONG; CHOI, 2017).

5.4.3 Cimento CP V ARI vs cimento CP III

Para facilitar a comparação entre os resultados dos ensaios de retração plástica realizados com dois tipos distintos de cimentos, foi realizado o agrupamento das espessuras médias das fissuras formadas por todos os traços em estudo. A Figura 43 ilustra esses resultados por meio de um gráfico.

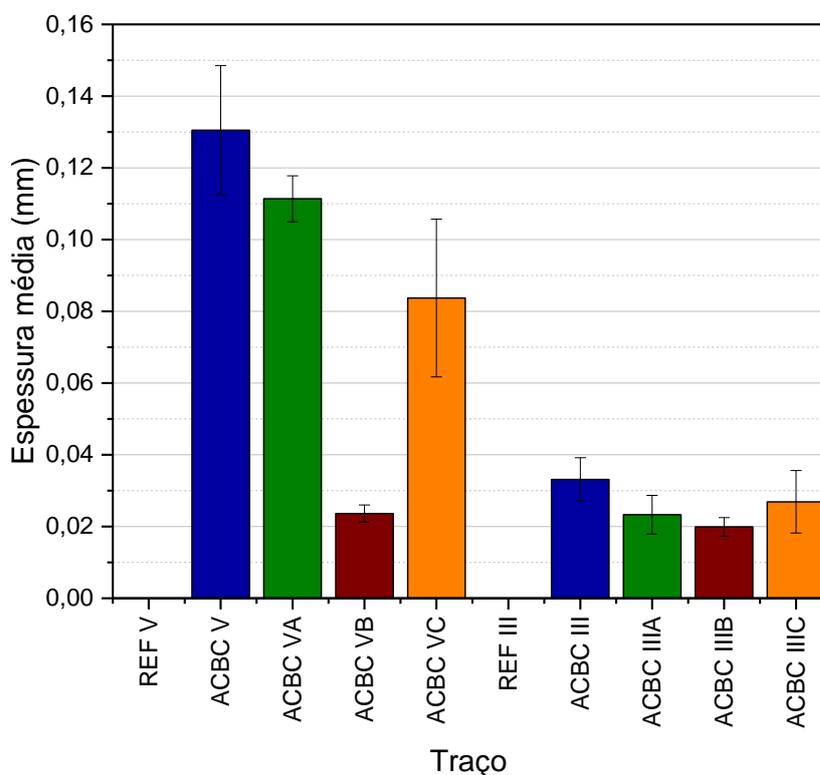


Figura 43 - Comparação entre as espessuras médias e desvios padrões dos dois cimentos

Inicialmente, notou-se maiores médias das espessuras de fissuras decorrentes dos traços contendo cimento CP V ARI. Esse resultado pode estar atrelado tanto às reações de hidratação mais rápidas ocorrentes na presença desse cimento (Cimento de alta resistência inicial), bem como à menor eficiência dos polímeros superabsorventes, uma vez que, tendo maior velocidade nas reações, a demanda pela quantidade de água de amassamento de maneira precoce aumenta, minimizando

o efeito de “reservatórios” dos PSAs e sua capacidade em atuar como agentes de cura.

A Tabela 17, apresenta as porcentagens de aumento das espessuras médias dos traços com PSAs em relação aos traços com ACBC, mas sem polímeros e seus respectivos tipos de cimento.

Tabela 17 - Porcentagens de redução das espessuras médias das fissuras do ensaio de retração plástica (CP V ARI vs CP III)

Traço	Redução das espessuras médias
ACBC VA	14,64%
ACBC VB	81,92%
ACBC VC	35,86%
ACBC IIIA	29,61%
ACBC IIIB	39,88%
ACBC IIIC	18,73%

Nota: A porcentagem de redução foi calculada com relação aos traços ACBC V e ACBC III, conforme o tipo de cimento utilizado.

Também foi possível notar por meio da comparação entre os traços, a maior similaridade entre os resultados do PSA-B na presença dos dois tipos de cimentos, com relação ao valor médio de espessura. No entanto, frente ao traço com cimento CP V ARI, ele promoveu redução de mais de 80% na espessura média das fissuras (Comparando com o traço ACBC V). Existe então, a possibilidade desse PSA auxiliar nos efeitos do consumo precoce da água de amassamento na presença do cimento CP V ARI. Destaca-se que esse mesmo polímero proporcionou fissuras de menor proporção para ambos os cimentos utilizados. Isso pode ser atribuído a um teor de umidade ótimo proporcionado pelo PSA de capacidade de absorção intermediária. Sendo assim, esse traço não possuía umidade excessiva a ponto de perder grande quantidade de água para o exterior precocemente e nem possuía baixa umidade a

ponto de favorecer os efeitos de retração devido a fatores somados, como influência do exterior e efeitos de autodessecação das argamassas.

5.5 Retração autógena

5.5.1 Cimento CP V ARI

A Figura 44 apresenta os resultados dos ensaios de retração autógena até 168 dias do traço de referência, ACBC sem polímeros e ACBC com os polímeros A, B e C, para os quais foi utilizado cimento CP V ARI.

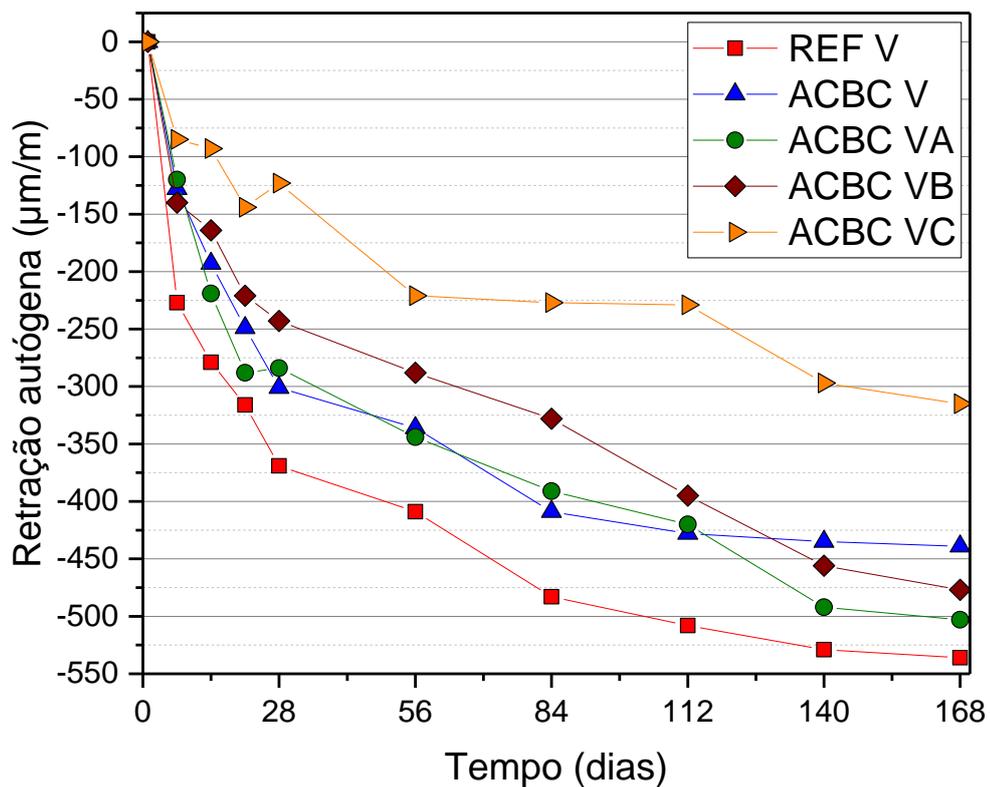


Figura 44 - Retração autógena até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CP V ARI

Por meio das médias das triplicatas de cada traço foi possível notar diferentes comportamentos de cada curva. Até 28 dias os traços sem polímeros (REF V e ACBC V) seguiram uma tendência de queda contínua em suas curvas de retração ao longo do ensaio, apresentando maiores resultados de retração autógena. Enquanto os traços com polímeros (ACBC VA, ACBC VB e ACBC VC) apresentaram uma queda inicial acompanhada de uma tendência de atenuação da curva, sobretudo entre os 21 e 28 dias. Essa atenuação próxima aos 28 dias aconteceu com os traços ACBC VA e ACBC VB, porém o traço ACBC VC já apresentou sinais de atenuação entre os 7 e 14 dias. Isso indica que o PSA-C apresenta maior potencial para redução da retração autógena de compósitos cimentícios com ACBC.

No entanto, em idades mais avançadas, o traço com ACBC sem a presença de polímeros também apresentou uma atenuação em sua curva a ponto de ter uma redução na retração autógena maior do que os traços com os polímeros superabsorventes A e B. Essa ultrapassagem das curvas aconteceu entre as idades de 112 e 140 dias de ensaio. Com isso, supõe-se que, mesmo promovendo a densificação dos compósitos cimentícios, a ACBC também possui propriedades que reduzem a retração autógena. Uma das propriedades que pode estar influenciando nesse resultado foi a maior absorção se comparada aos agregados naturais, sendo de 0,9 frente a 0,34 e 0,46 das areias fina e média, respectivamente.

De maneira geral, a maior retração autógena após 168 dias de ensaio foi do traço REF, seguido pelos traços ACBC VA, ACBC VB, ACBC V e, por fim, ACBC VC. O traço ACBC V sem a adição de PSA apresentou redução de 18,10% em relação ao traço REF. E comparando os traços com PSA ao traço contendo ACBC sem polímeros, os traços ACBC VA e ACBC VB apresentaram aumentos da retração autógena em 14,58% e 8,65%, respectivamente. Apenas o traço contendo o PSA C apresentou redução na retração autógena, de 28,24%. Esse efeito se deve a maior quantidade de água para ser disponibilizada ao longo do processo de cura conforme a necessidade das reações de hidratação do cimento. Como foi observada a capacidade de atuação da ACBC sem PSA na redução da retração autógena, a Figura 45 apresenta graficamente a relação entre a relação a/c total e a redução da retração autógena em %, de todos os traços contendo ACBC em relação ao traço REF.

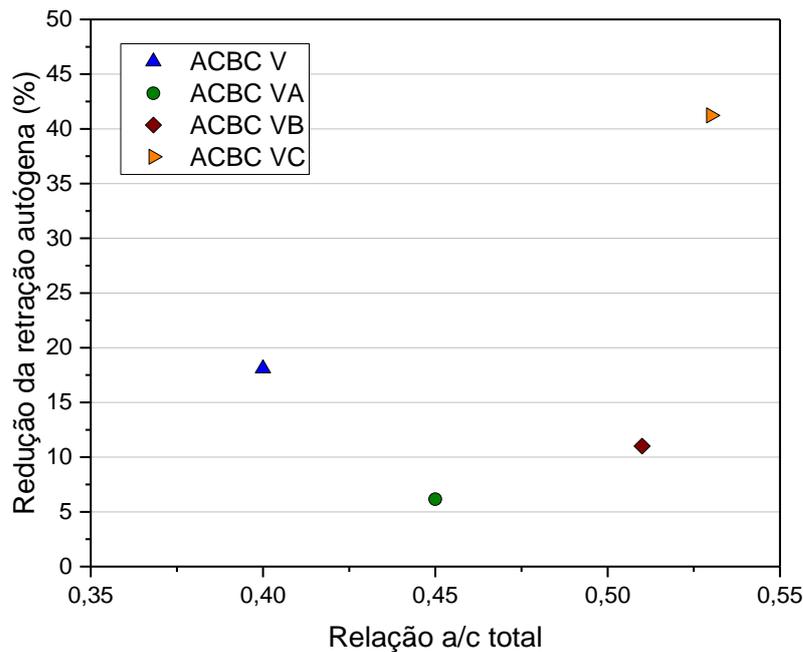


Figura 45 - Relação entre a redução da retração autógena (%) e a relação a/c total de cada traço - CP V ARI

Analisando o gráfico, considerando apenas os traços com polímeros superabsorventes, a redução na retração autógena de cada um aos 168 dias seguiu a mesma ordem da quantidade de água total das misturas, sendo 0,45 para ACBC VA, 0,51 para ACBC VB e 0,53 para ACBC VC. Ou seja, quanto maior a quantidade de água dos traços, maior foi a redução da retração autógena. Isso se deve ao efeito dos PSAs como agentes de cura, neutralizando a retração autógena em níveis superiores, conforme a quantidade de água disponível para ser fornecida aos traços. Esse resultado também foi observado por outros pesquisadores (SHEN et al., 2016). Assim, a maior quantidade de água absorvida pelo PSA ficou disponível para ser liberada conforme a necessidade de hidratação da mistura ao longo do processo de cura. Esse efeito comprova a eficiência dos polímeros superabsorventes em sua atuação como agentes de cura.

Tendo em vista que todos os traços com polímeros reduziram a retração autógena se comparados ao traço de referência, os polímeros superabsorventes utilizados no presente estudo possuem capacidade de minimizar problemas decorrentes da retração dos compósitos cimentícios, inclusive, com a presença de

ACBC em suas matrizes. Outros estudos também obtiveram resultados positivos com relação a utilização de polímeros superabsorventes na minimização de problemas relacionados à retração autógena, mas sem a utilização em conjunto a agregados alternativos (ALMEIDA; KLEMM, 2018; MECHTCHERINE *et al.*, 2021).

Já era esperado que a utilização de polímeros superabsorventes auxiliasse na redução da retração autógena por conta de sua capacidade de atuar como reservatório e fornecer água ao longo das reações de hidratação das misturas. No entanto, notou-se que o traço contendo apenas ACBC, sem a utilização de polímeros superabsorventes teve comportamento similar ao traço com PSA-B, inclusive proporcionando resultados melhores do que dois traços com polímeros superabsorventes (ACBC VA e ACBC VB), com redução de 18,10% frente a 6,16% e 11,01%, respectivamente. A hipótese inicial do estudo era que a incorporação de ACBC no traço referência em substituição ao agregado miúdo faria com que ocorresse um refinamento da microestrutura. Esse efeito desencadearia o aumento da retração devido a menor porosidade da matriz se comparado ao traço de referência, sem incorporação de resíduos. Porém, o resultado do ensaio de retração autógena mostrou que mesmo promovendo uma matriz com maior refinamento dos poros em relação ao traço sem ACBC, a areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar de alguma forma, atua como um redutor da retração autógena nos compósitos cimentícios. Isso indica que o tamanho de partículas para promoção do melhor empacotamento e densificação da matriz não é o único fator para desencadeamento da retração autógena. A maior absorção de água pela ACBC (de 0,90% (ALMEIDA *et al.*, 2015), comparada com a absorção das areias fina e média de 0,34 e 0,46, respectivamente, conforme a Tabela 4 do Programa Experimental) pode ser o motivo pelo qual a ACBC possui capacidade (ainda que pequena) de atuar também como um agente de cura interna para os compósitos cimentícios. Isso se deve à maior porosidade e menor dimensão (em função da rugosidade e tamanho de partículas), sendo capazes de absorver e adsorver mais água, o que contribui no controle de liberação de água para reações de hidratação. Esse benefício também pode ser atribuído à atividade pozolânica mesmo que pequena da ACBC observada por outros autores que também utilizaram esse resíduo em substituição aos agregados naturais (MORETTI *et al.*, 2018).

Para validar a análise da retração autógena e avaliar se a diferença entre os resultados foi significativa, estatisticamente, foi realizada a análise de variância para cada conjunto de médias em cada idade. Foi considerado um nível de significância α de 5%, com isso, os resultados forneceram 95% de confiança. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração autógena - CP V ARI)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	0,001413998	10,32579787
14	3,89257E-05	24,32255083
21	0,000213506	16,44834437
28	1,22006E-05	31,44630872
56	0,000165514	17,46319797
84	2,93942E-05	25,89880359
112	2,14249E-05	27,78275212
140	0,000131206	18,43509213
168	0,000349468	14,62464489

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

Com base nessa análise, notou-se que existe diferença significativa entre os resultados dos traços analisados, uma vez que todos os valores de F obtidos foram superiores ao valor de F crítico. E com o intuito de identificar quais comparações entre traços apresentaram maior influência sobre essa diferença apontada pela ANOVA, o Teste de Tukey foi performado e o resultado está apresentado na Tabela 19.

Por meio das comparações por pares provenientes do Teste de Tukey foi possível notar que a diferença significativa apontada pela ANOVA foi expressivamente influenciada pelo traço ACBC VC, o qual apresentou similaridade aos outros traços estudados em apenas 10,26% das comparações realizadas em todas as idades. Esse

resultado corrobora com a análise gráfica, na qual foi observada maior efetividade do polímero superabsorvente C na redução da retração autógena.

Tabela 19 - Teste de Tukey para as médias de retração autógena (CP V ARI)

Traço/Idade (dias)	7	14	21	28	56	84	112	140	168
REF V x ACBC V	≠	≠	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
REF V x ACBC VA	≠	≈	≈	≠	≈	≠	≈	≈	≈
REF V x ACBC VB	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≈	≈
REF V x ACBC VC	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC V x ACBC VA	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC V x ACBC VB	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC V x ACBC VC	≈	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC VA x ACBC VB	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC VA x ACBC VC	≈	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC VB x ACBC VC	≈	≠	≠	≠	≈	≠	≠	≠	≠

Também foi possível notar que o traço com ACBC sem polímeros apresentou diferença significativa em relação ao traço referência apenas nas duas primeiras idades. Inclusive, a diferença significativa apontada nas duas primeiras idades foi proporcionada pelos melhores resultados promovidos pela ACBC no que diz respeito à retração autógena. Com isso, comprova-se estatisticamente que, a adição de ACBC não afeta negativamente os compósitos cimentícios moldados com cimento CP V ARI, no âmbito da retração autógena, mesmo com a densificação da matriz cimentícia.

Por fim, essa análise também apontou a similaridade entre os traços ACBC V, ACBC VA e ACBC VB, os quais não apresentaram diferença significativa em nenhuma das idades ao longo de todo ensaio.

Como a maior parte das reações do cimento ocorre em idades iniciais, principalmente em misturas com CP V ARI, e a retração autógena ocorre durante esse

processo, a Figura 46 apresenta os resultados até 14 dias para melhor compreensão do comportamento das matrizes cimentícias do estudo.

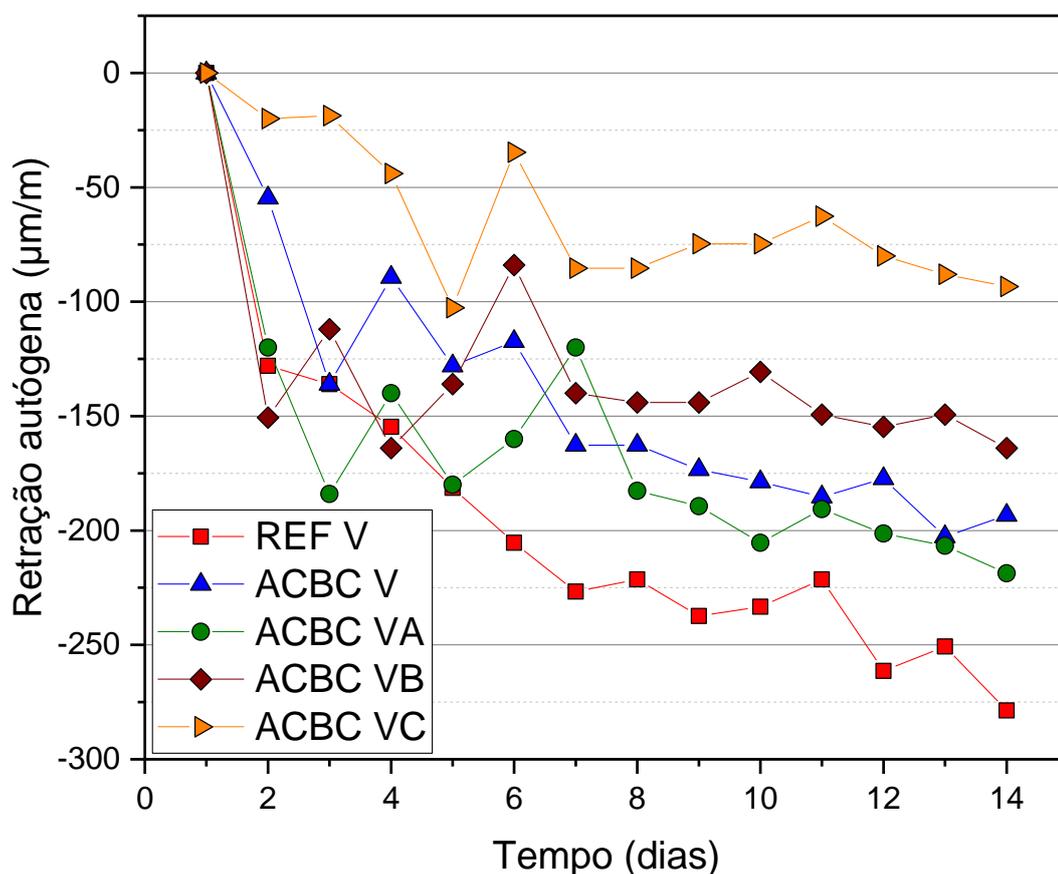


Figura 46 - Análise da retração autóloga nas idades iniciais (até 14 dias) - CP V ARI

Diferentemente dos resultados mostrados na Figura 44, os quais foram coletados em idades estratégicas de 7, 14, 21, 28, 56, 84, 112, 140 e 168 dias, esses resultados foram apresentados com intervalo de 1 dia a fim de facilitar a análise do comportamento de cada traço com maior precisão em idades iniciais.

Observando os resultados de ambos os gráficos, é possível perceber que o PSA com maior influência na retração autóloga foi o PSA-C, seguido do PSA-B e, por último, o PSA-A. Avaliando apenas os primeiros 14 dias de ensaio (Figura 46), o traço ACBC V já obteve menor retração autóloga do que o ACBC VA, mostrando logo nas primeiras idades a sua capacidade para redução da retração autóloga (Figura 44).

Com base nesses resultados percebeu-se também que apenas o traço sem ACBC e sem PSA não apresentou picos consideráveis que representassem um sinal de atenuação em sua curva, e, conseqüentemente um efeito de redução da retração autógena. Por outro lado, os outros traços, inclusive o com ACBC e sem PSA, apresentaram picos elevados entre o terceiro e oitavo dia de ensaio, seguidos de uma atenuação das curvas.

A fim de levantar uma maior quantidade de informações é comum que este ensaio seja realizado com a medida inicial sendo logo após o tempo de final de pega, no entanto, por conta do manuseio dos corpos de prova e cuidados para não rompê-los, principalmente os moldados com cimento CP III, a idade inicial de coleta da retração autógena foi 24 horas após o primeiro contato do cimento com a água de amassamento. Outro estudo poderia avaliar a retração nas idades iniciais, com menor espaçamento entre as medições, para aprofundar o conhecimento relacionado ao comportamento desses traços diante da retração autógena no início das reações de hidratação (entre o tempo final de pega e as primeiras 24 horas de ensaio).

Durante o ensaio de retração autógena também foi realizado um acompanhamento das massas dos corpos de prova. Isso permitiu validar o revestimento utilizado para impedir a perda da água de amassamento para o exterior dos CPs. A Figura 47 apresenta a evolução das massas dos corpos de prova ao longo do ensaio de retração autógena.

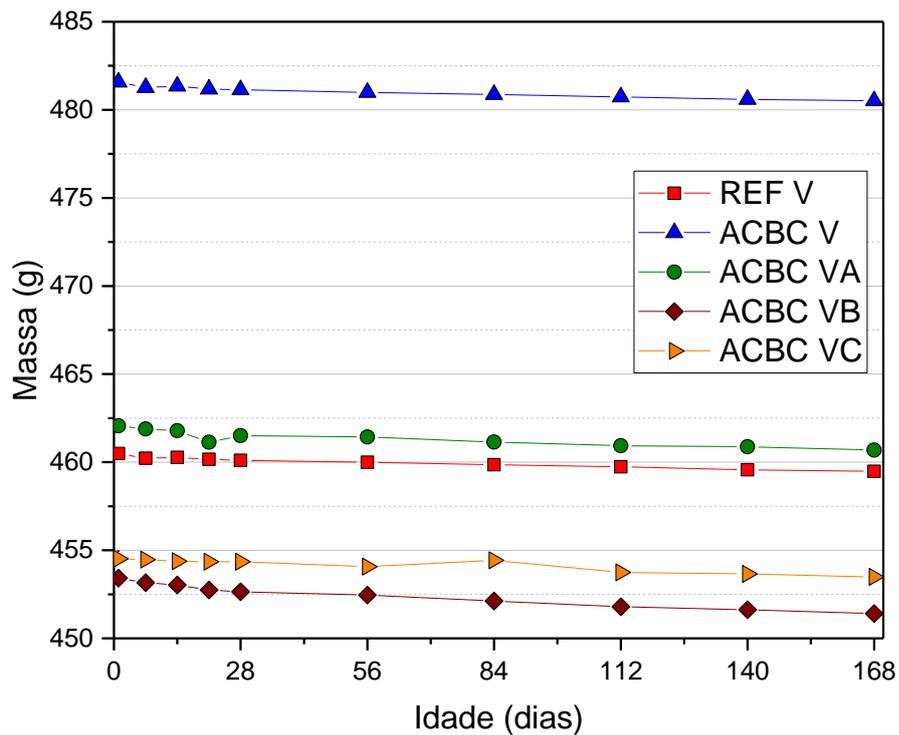


Figura 47 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração autógena - CP V ARI

A partir dessa análise foi possível confirmar a eficiência do revestimento adotado para impedir a perda de água do interior dos corpos de prova para o ambiente, uma vez que apresentaram variação de massa entre 0,2% e 0,3% (168 dias). Esses valores estão similares aos resultados obtidos por Neto, Cincotto e Repette (2010), que chegaram a uma variação de massa de aproximadamente 0,2% utilizando metodologia similar de revestimento. A título de comparação, a Figura 48 apresenta os resultados da variação de massa de corpos de prova (REF e ACBC) completamente expostos ao ambiente (sem a utilização do revestimento), analisados até 28 dias.

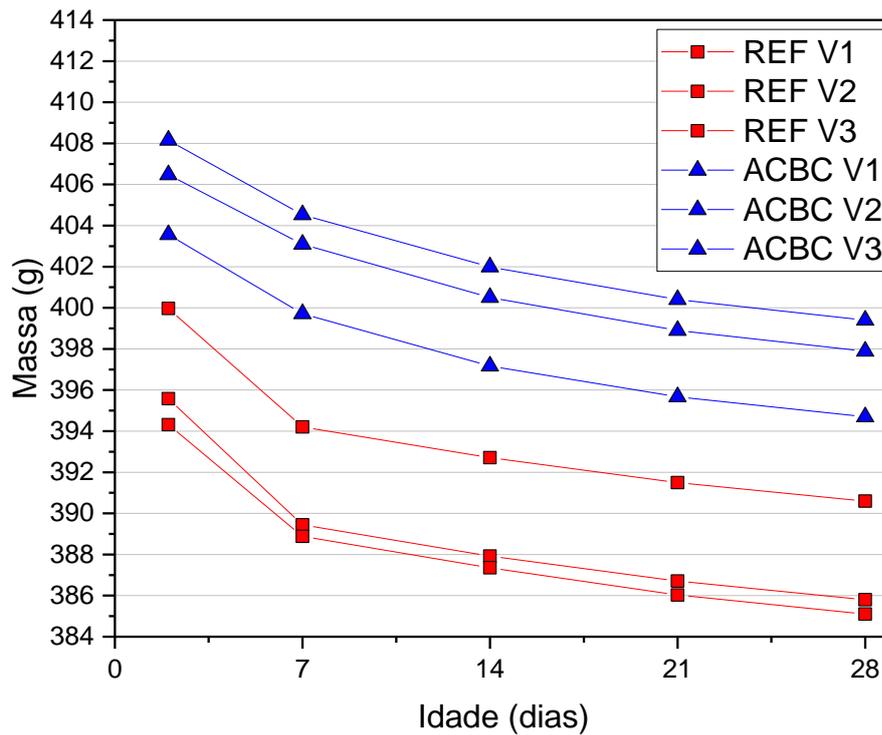


Figura 48 - Comportamento das massas dos CPs sem revestimento

Esse ensaio foi realizado apenas nos traços REF V e ACBC V, sem a utilização de PSAs. Foram apresentados todos os resultados das triplicatas para averiguar o comportamento semelhante em todas as amostras. Notou-se que sem a utilização do revestimento no entorno dos corpos de prova, ocorreram reduções nas massas entre 2 e 3% após 28 dias de ensaio (Figura 48), enquanto os corpos de prova revestidos não passaram de 0,3% de variação nesse mesmo período (Figura 47). Para o ensaio de retração autógena é importante que a variação de massa seja mínima por conta das reações de hidratação das misturas e tentativa de impedir qualquer influência externa.

Portanto, o revestimento com papel alumínio e parafina dos corpos de prova se mostrou eficiente e é indicado para ensaios que necessitam de redução da perda de água para o ambiente, como o ensaio de retração autógena.

5.5.2 Cimento CP III

A Figura 49 apresenta os resultados dos ensaios de retração autógena até 168 dias do traço de referência, ACBC sem polímeros e ACBC com os polímeros A, B e C, no entanto, com a utilização do cimento CP III.

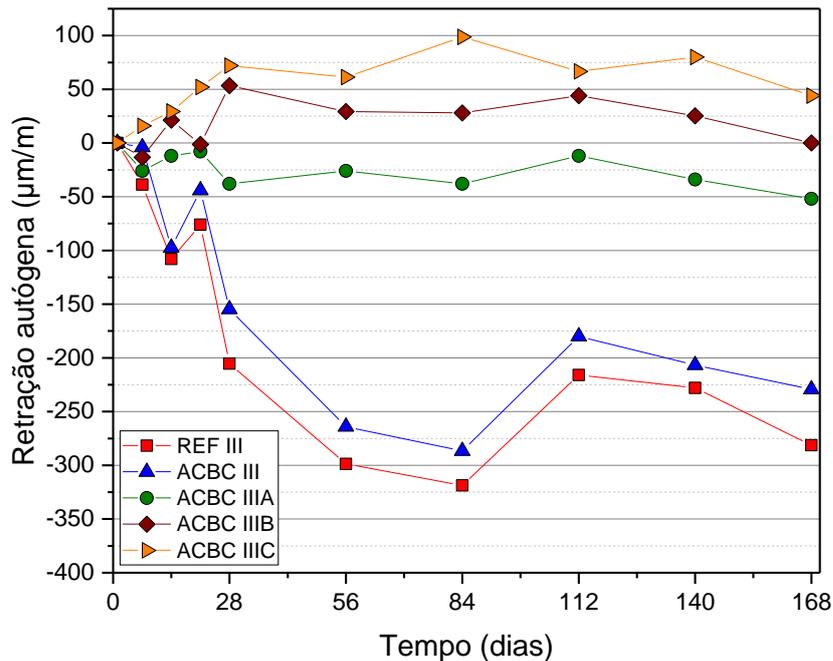


Figura 49 - Retração autógena até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CP III

Por meio das médias das triplicatas de cada traço os diferentes comportamentos de cada curva ficaram evidentes, principalmente se for levado em conta os traços com e sem a presença de PSA. Enquanto os traços sem polímeros (REF III e ACBC III) seguiram uma tendência de queda contínua em suas curvas de retração ao longo do ensaio, os traços com polímeros (ACBC IIIA, ACBC IIIB e ACBC IIIC) apresentaram uma tendência de atenuação da curva, desde as idades iniciais de hidratação. Essa atenuação justifica os efeitos promovidos pela utilização dos polímeros, os quais reduzem os efeitos de retração autógena.

A maior retração autógena foi no traço REF seguido do traço ACBC, que em relação a amostra branca, obteve redução de 18,48% (ambos traços sem a presença

de polímeros superabsorventes). Por outro lado, os compósitos com PSA apresentaram a seguinte ordem crescente de redução da retração autógena: ACBC IIIA < ACBC IIIB < ACBC IIIC. Esses traços apresentaram redução de 77,33%, 100% e 119,19%, respectivamente com relação ao traço ACBC III (com ACBC e sem PSA). A Figura 50 apresenta a relação entre a porcentagem de redução da retração autógena e a relação a/c total dos traços moldados com cimento CP III.

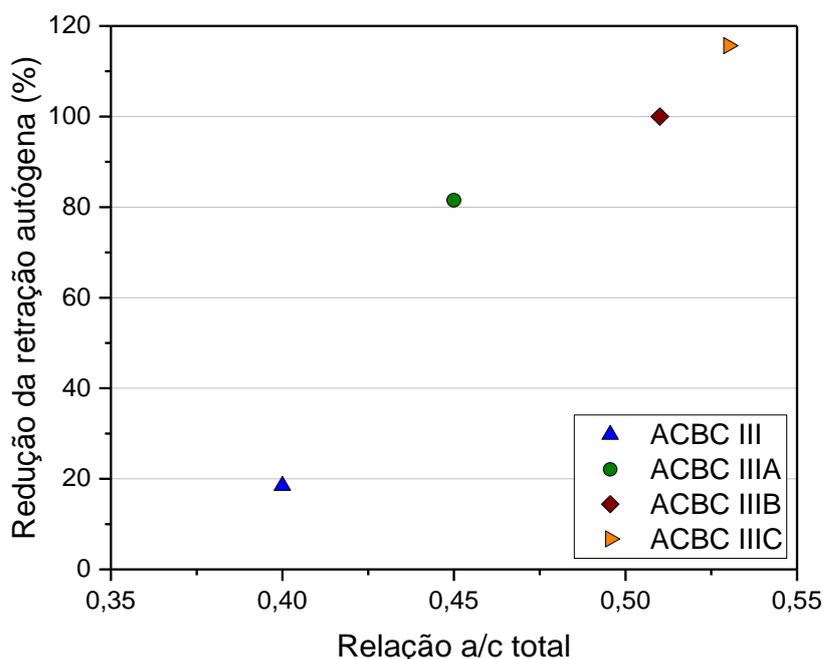


Figura 50 - Relação entre a redução da retração autógena (%) e a relação a/c total de cada traço - CP III

A ordem crescente de redução da retração autógena dos traços contendo ACBC em relação ao traço REF, coincide diretamente com a quantidade de água total dos traços, sendo 0,45 para ACBC IIIA, 0,51 para ACBC IIIB e 0,53 para ACBC IIIC. As porcentagens de redução foram de 18,48%, 81,52%, 100% e 115,64% dos traços ACBC III, ACBC IIIA, ACBCIIIB e ACBC IIIC, respectivamente. Assim, a maior quantidade de água absorvida pelo PSA ficou disponível para ser liberada conforme a necessidade de hidratação da mistura ao longo do processo de cura. O valor de 100% corresponde ao limite no qual o corpo de prova começa a apresentar expansão.

Os traços ACBC IIIB e ACBC IIIC apresentaram esse comportamento, com o traço ACBC IIIB atingindo o limite e o ACBC IIIC expandindo em 19,19%. A fim de averiguar a possibilidade de redução da resistência mecânica dos corpos de prova em decorrência dessa expansão, os resultados dos ensaios de resistência à compressão e à tração na flexão foram analisados e apresentados mais adiante.

Assim como foi realizado para os traços com cimento CP V ARI, também foi realizada a análise de variância para cada conjunto de médias em cada idade dos traços com cimento CP III, com o mesmo nível de significância (α de 5%). Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração autógena - CP III)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	0,002241972	9,150147203
14	0,000100577	19,60405257
21	0,000118513	18,87518911
28	0,005457123	7,162368011
56	0,002497277	8,890199934
84	0,000902314	11,57958522
112	6,06289E-07	59,74108911
140	3,79065E-06	40,50455053
168	1,60948E-07	78,77893013

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

Por meio da ANOVA confirmou-se, estatisticamente, que existe diferença significativa entre os resultados de retração autógena em todas as idades. E para identificar quais comparações entre traços apresentaram maior influência sobre essa diferença apontada pela ANOVA, assim como foi realizado durante o ensaio com cimento CP V ARI, foi realizado o Teste de Tukey (Tabela 21).

Tabela 21 - Teste de Tukey para as médias de retração autógena (CP III)

Traço/Idade (dias)	7	14	21	28	56	84	112	140	168
REF III x ACBC III	≠	≈	≠	≈	≈	≈	≈	≈	≠
REF III x ACBC IIIA	≈	≠	≠	≈	≈	≈	≠	≠	≠
REF III x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
REF III x ACBC IIIC	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIA	≈	≠	≈	≈	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIB	≈	≠	≈	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIC	≈	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIA x ACBC IIIB	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC IIIA x ACBC IIIC	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≠	≠
ACBC IIIB x ACBC IIIC	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈

Com base no Teste de Tukey realizado foi possível comprovar a semelhança apontada por meio das análises gráficas entre os traços contendo polímeros superabsorventes. Só foi observada diferença significativa ao comparar os traços ACBC VA e ACBC VC nas idades de 140 e 168 dias. Por outro lado, os traços sem polímeros superabsorventes apresentaram diferença significativa com relação aos traços com polímeros superabsorventes na maioria das idades, corroborando com o que foi apontado durante as análises gráficas.

Tendo em vista as poucas ocasiões nas quais houve diferença significativa entre os traços contendo diferentes tipos de PSAs e todos minimizaram a retração autógena de corpos de prova moldados com cimento CP III, comprovou-se que esses materiais foram eficazes na sua utilização como agentes de cura interna em compósitos cimentícios com agregados alternativos. Portanto, podem ser utilizados para auxiliar na minimização de fissuras decorrentes da retração autógena.

E para melhor compreensão do comportamento da retração autógena nas idades iniciais, os resultados coletados diariamente, até 14 dias, para os corpos de prova confeccionados com CP III estão apresentados na Figura 51.

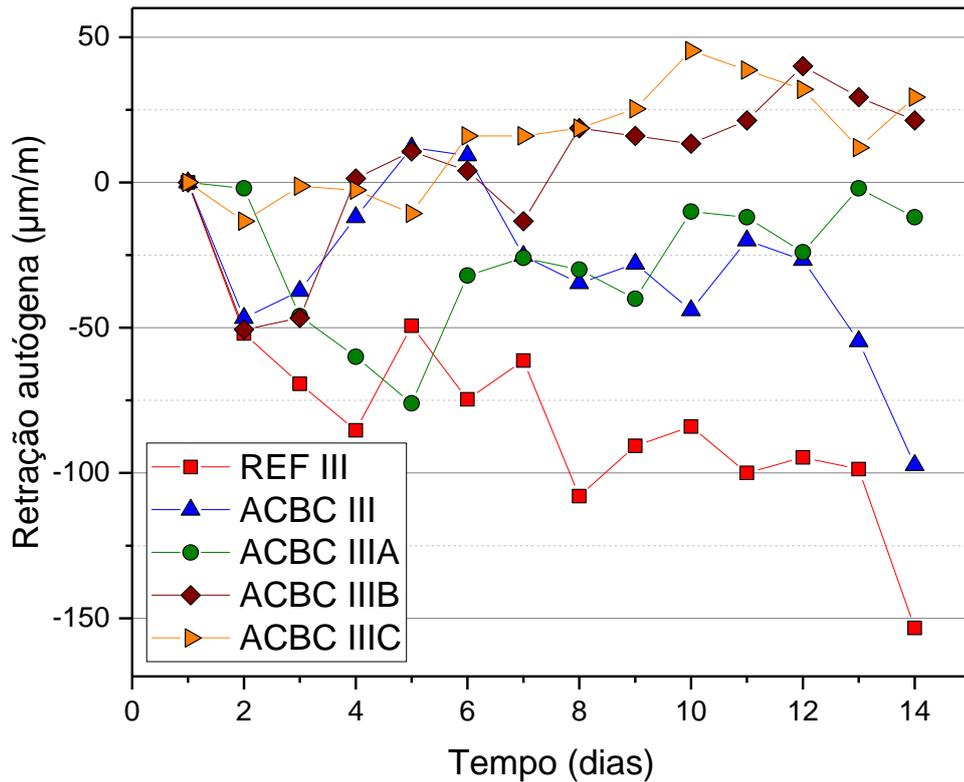


Figura 51 - Análise da retração autógena nas idades iniciais (até 14 dias) – CP III

Observando os resultados de ambos os gráficos, é possível perceber que o PSA com maior influência na retração autógena foi o PSA-C, seguido do PSA-B, com resultados similares e, por último, o PSA-A, assim como no ensaio com o cimento CP V ARI. No entanto, é possível notar que, já nas idades iniciais, os corpos de prova sofreram expansão por conta do efeito promovido pelos polímeros superabsorventes. Esse comportamento indica sinais de maior resistência à retração autógena a médio e longo prazos, justificando a utilização de polímeros superabsorventes a fim de reduzir a suscetibilidade a fissuras provenientes desse tipo de retração.

Também notou-se que nas primeiras idades a média dos resultados dos corpos de prova com ACBC e sem polímeros também sofreu redução na retração autógena se comparada à média da amostra branca (REF). Apesar disso, entre 12 e 14 dias a curva apresentou uma queda significativa, aproximando os valores de retração ao traço REF. Com isso, evidencia-se o efeito semelhante ao promovido pelos polímeros superabsorventes, no entanto, em menor intensidade. Porém, maiores estudos são necessários para avaliar se esse resultado é promovido pela maior absorção da cinza

em relação aos agregados naturais ou existem outros parâmetros preponderantes para tal característica ser desencadeada.

Para misturas com o cimento CP III também foi realizado um acompanhamento das massas dos corpos de prova com o intuito de validar o revestimento utilizado para impedir a perda da água de amassamento para o exterior dos CPs, para ambos os cimentos (Figura 52).

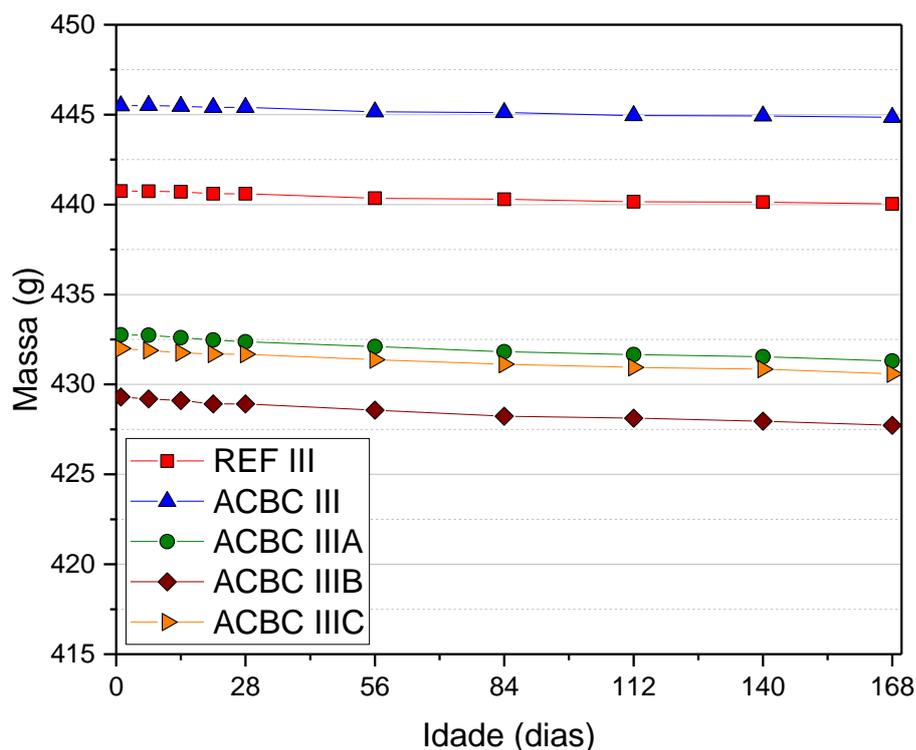


Figura 52 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração autóloga - CP III

Essa análise também confirmou a eficiência do revestimento adotado para impedir a perda de água do interior dos corpos de prova para o ambiente com variação de massa entre 0,2% e 0,3%. Esses valores também encontram-se na mesma faixa de resultados obtidos com o cimento CP V ARI e semelhantes aos resultados de Neto, Cincotto e Repette (2010), os quais chegaram a uma variação de massa de 0,2% utilizando metodologia similar de revestimento.

5.5.3 Cimento CP V ARI vs cimento CP III

Com o intuito de comparar os resultados dos ensaios provenientes dos dois cimentos distintos e fornecer uma visão holística do comportamento dos PSAs utilizados neste estudo, os resultados provenientes dos ensaios de retração autóloga de todos os traços foram agrupados em um gráfico, apresentado na Figura 53.

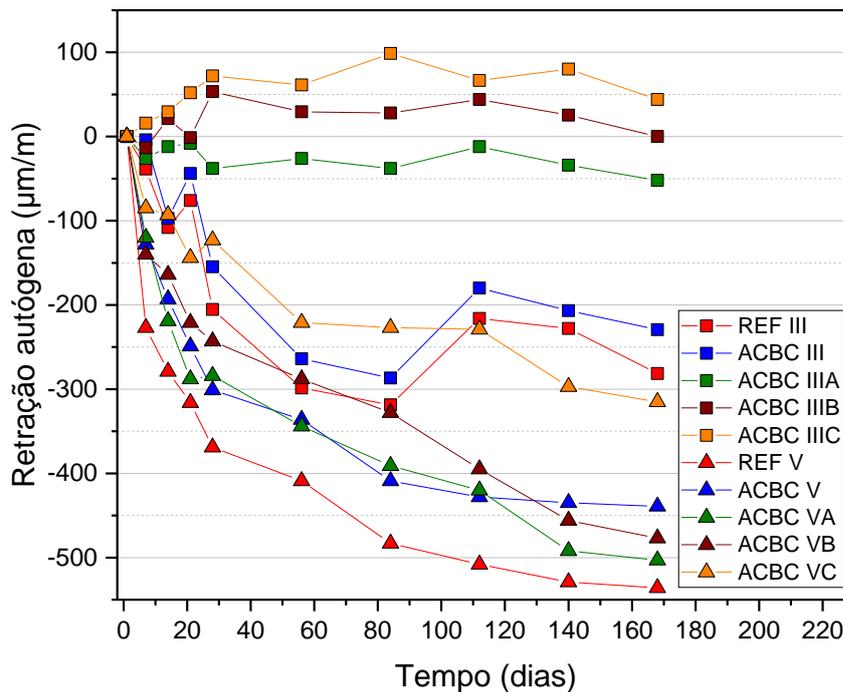


Figura 53 - Retração autóloga até 168 dias comparando o cimento CP V ARI com o CP III

Por meio do ensaio de retração autóloga, utilizando dois tipos de cimento notou-se também uma maior efetividade dos polímeros superabsorventes com a utilização do cimento CP III, ambiente na qual os compósitos cimentícios apresentaram maior redução da retração. Esse efeito pode ter ocorrido por conta da rápida hidratação dos componentes da mistura com CP V ARI frente ao cimento CP III, uma vez que o primeiro possui como característica, apresentar alta resistência inicial. Com isso, a água livre da mistura e absorvida pelo PSA é utilizada precocemente durante as reações, reduzindo, de certa forma, o efeito de reservatório

promovido por esses agentes. Assim, os polímeros conseguem reter água por mais tempo e proporcionar espaço extra (no estado colapsado) para deposição de produtos de hidratação tardios (em decorrência da reação mais lenta do CP III). Além disso, outros autores já apontaram que a retração autógena é inferior em misturas com escória de alto forno devido às reações mais lentas dos materiais cimentícios suplementares (SNOECK; JENSEN; DE BELIE, 2015).

Diferente dos resultados obtidos com os compósitos cimentícios confeccionados com cimento CP V ARI, com o com o cimento CP III houve um maior distanciamento entre os resultados dos traços com polímeros e o traço com ACBC e sem polímeros. Isso ocorreu em virtude da menor efetividade dos polímeros superabsorventes nos traços confeccionados com cimento CP V ARI. Mesmo assim, o traço com ACBC proporcionou uma redução da retração autógena se comparado ao traço REF (sem polímeros e sem ACBC). Assim, comprova-se, ainda que em menor proporção, que mesmo com a densificação das matrizes cimentícias, a contribuição da ACBC em amenizar os efeitos da retração autógena nos corpos de prova é evidente. Na Tabela 22 foram elencadas as porcentagens de redução/aumento da retração autógena de cada traço contendo PSA e ACBC em comparação ao traço contendo seu respectivo cimento, com ACBC e sem a presença de PSA (ACBC V e ACBC III).

Tabela 22 - Porcentagens de redução e aumento da retração autógena dos traços com cimento CP V ARI e CP III

Traço	Redução da retração autógena	Aumento da retração autógena
ACBC VA	-	14,58%
ACBC VB	-	8,65%
ACBC VC	28,24%	-
ACBC IIIA	77,33%	-
ACBC IIIB	100%	-
ACBC IIIC	119,19%	-

Nota: A porcentagem de redução foi calculada com relação aos traços ACBC V e ACBC III, conforme o tipo de cimento utilizado.

Com base nos resultados apresentados notou-se a maior eficiência do polímero superabsorvente C como agente de cura interna, uma vez que reduziu a retração em 28,24% (CP V ARI) e 119,19% (CP III) se comparado ao traço com ACBC e sem PSA. Por outro lado, os traços contendo PSA-A obtiveram menor redução, ou até mesmo aumento da retração autógena. Ressalta-se que este fator está atrelado a maior quantidade de água disponível para atuar durante o processo de cura das misturas. Destaca-se também que nas ocasiões em que houve aumento da retração autógena, esse fato só ocorreu comparando os resultados ao traço contendo ACBC sem PSA. A análise gráfica mostrou a redução da retração autógena para todos os casos nos quais os traços com polímeros foram comparados a amostra de referência, ou seja, sem ACBC e sem polímeros. Nesse caso, como foi observada a atuação da ACBC reduzindo a retração autógena, é possível que exista uma competição entre esse resíduo e os PSAs A e B, na absorção da água da mistura. O mesmo não ocorreu com o PSA-C, o qual possui capacidade de absorção mais elevada do que os outros dois polímeros avaliados.

5.6 Retração por secagem

5.6.1 Cimento CP V ARI

A Figura 54 apresenta os resultados dos ensaios de retração por secagem até 168 dias do traço de referência, ACBC sem polímeros e ACBC com os polímeros A, B e C, para os quais foi utilizado cimento CP V ARI.

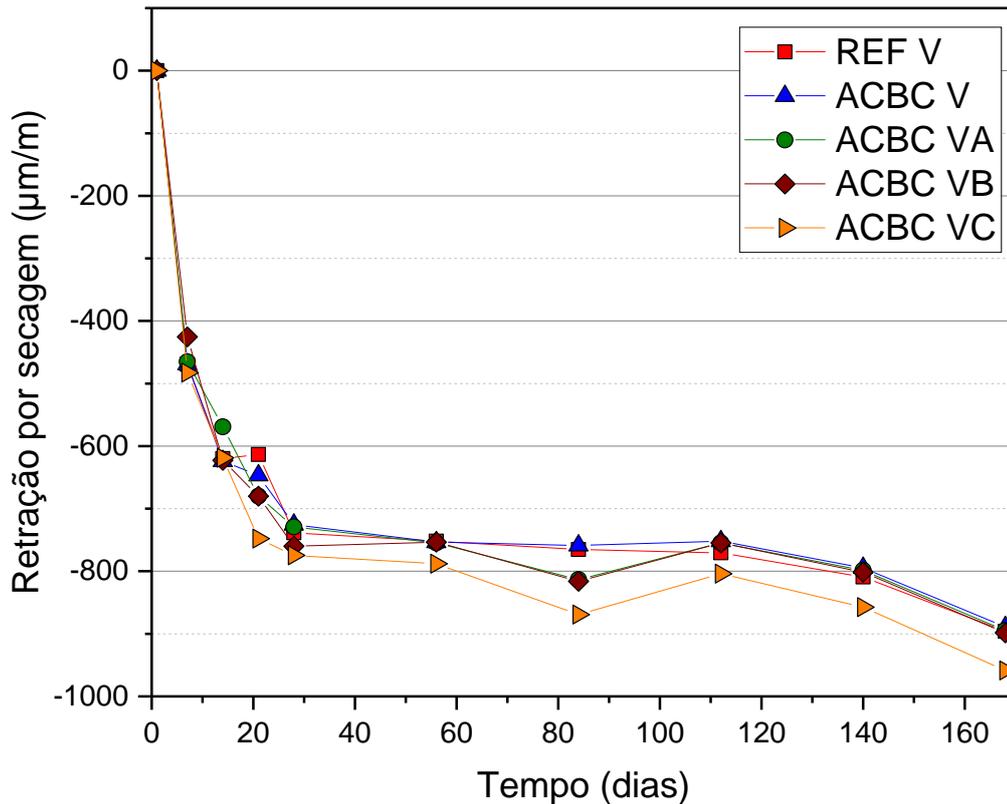


Figura 54 - Retração por secagem até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CP V ARI

Diferente do ensaio de retração autógena, sob efeito de retração por secagem os polímeros superabsorventes não promoveram modificações significativas no comportamento dos traços. O traço ACBC V teve redução na retração por secagem de apenas 0,74% em relação ao traço REF. De maneira geral, os resultados foram próximos uns aos outros, tendo o traço com o polímero superabsorvente C a maior retração por secagem ao longo do ensaio (aumento de 7,80% em relação ao traço ACBC V). Esses resultados ocorreram por conta da maior facilidade de saída de água para o ambiente por conta da exposição direta dos corpos de prova. Isso promove a redução precoce da quantidade de água absorvida pelos polímeros superabsorventes, minimizando a atuação como agentes de cura. Enquanto o ensaio de retração autógena simula concretos/argamassas de alto desempenho, ou seja, que impedem a saída de grandes quantidades de água para o ambiente, o ensaio de retração por

secagem simula compósitos cimentícios que permitem essa perda de água de amassamento ao longo do processo de cura.

A ANOVA foi performada a fim de averiguar se mesmo com a proximidade dos resultados apresentados graficamente, houve diferença significativa entre algum traço em alguma das idades estudadas. O resultado da ANOVA está apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração por secagem - CP V ARI)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	0,153948186	2,112082671
14	0,06012624	3,235232068
21	0,000102102	19,5362117
28	0,195081245	1,8551263
56	0,406915104	1,103252033
84	0,000364894	14,47314578
112	0,058533693	3,270072993
140	0,02023726	4,796915167
168	0,017331622	5,046436285

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

Esses resultados permitiram notar que houve diferença significativa entre os traços analisados nas idades de 21, 84, 140 e 168 dias, uma vez que os resultados de F foram superiores ao F crítico. Nas idades de 21 e 84 dias essa diferença pode ser percebida também pela análise gráfica, visto que os resultados apresentaram-se mais dispersos. No entanto, para as idades de 140 e 168 dias essa diferença só pôde ser comprovada estatisticamente. E para auxiliar na compreensão de quais traços apresentaram maior influência sobre essa diferença apontada pela ANOVA, a Tabela 24 apresenta os resultados do Teste de Tukey.

Tabela 24 - Teste de Tukey para as médias de retração por secagem (CP V ARI)

Traço/Idade (dias)	7	14	21	28	56	84	112	140	168
REF V x ACBC V	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
REF V x ACBC VA	≈	≈	≠	≈	≈	≈	≈	≈	≈
REF V x ACBC VB	≈	≈	≠	≈	≈	≈	≈	≈	≈
REF V x ACBC VC	≈	≈	≠	≈	≈	≠	≈	≈	≠
ACBC V x ACBC VA	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC V x ACBC VB	≈	≈	≈	≈	≈	≠	≈	≈	≈
ACBC V x ACBC VC	≈	≈	≠	≈	≈	≠	≈	≠	≠
ACBC VA x ACBC VB	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC VA x ACBC VC	≈	≈	≠	≈	≈	≠	≈	≠	≠
ACBC VB x ACBC VC	≈	≈	≠	≈	≈	≈	≈	≠	≠

Observando os resultados do Teste de Tukey foi possível notar que a diferença significativa apontada pela ANOVA nas idades de 21, 84, 140 e 168 dias ocorreu por conta do traço ACBC VC, o qual quando comparado entre pares diferiu de todos os traços em pelo menos uma dessas idades. As outras comparações na qual apontaram diferença significativa pelo Teste de Tukey na maior parte das idades ficou por conta do traço REF V. Mesmo assim, retomando os resultados da ANOVA, notou-se que mesmo apontando diferença, apenas nas idades de 21 e 84 dias o valor de F teve uma proporção expressiva com relação ao valor de F crítico, considerando a quantidade de dados analisados. Esse fato corrobora com a pequena dispersão dos resultados, apontada na análise gráfica.

Como o comportamento dos traços foi similar, e seguindo a metodologia de análise do ensaio de retração autógena, os resultados do ensaio de retração por secagem também foram analisados até 14 dias, no qual as aferições ocorreram diariamente (Figura 55). Destaca-se, mais uma vez que, esse período é quando ocorrem as reações iniciais de hidratação do cimento, momento preponderante para atuação dos polímeros superabsorventes como agentes de cura e redução da suscetibilidade de fissuração dos corpos de prova.

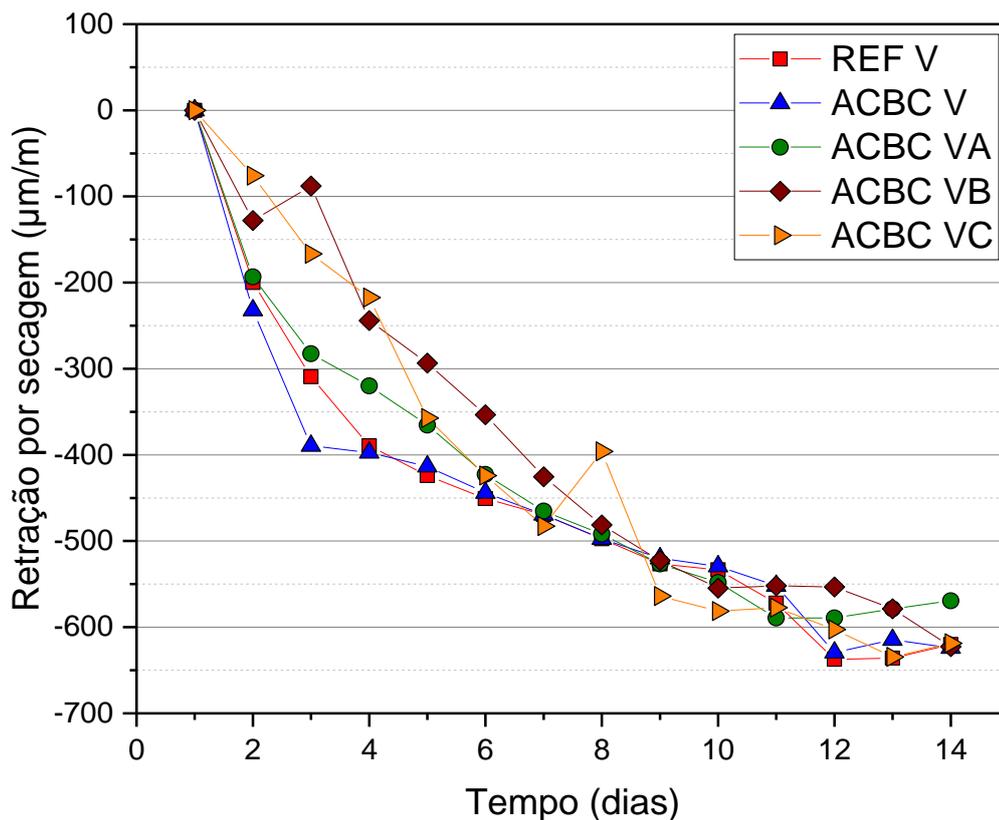


Figura 55 - Análise da retração por secagem nas idades iniciais (até 14 dias) - CP V ARI

Nesse recorte dos resultados foi possível notar uma atuação dos polímeros superabsorventes como redutores de retração até 8 dias, uma vez que, os traços contendo esses materiais apresentaram valores de retração inferiores aos traços sem polímeros nesse período (REF V e ACBC V). No entanto, nota-se que, conforme o ensaio progrediu, os traços obtiveram resultados mais similares, e após 14 dias apresentaram comportamento que seguiu ao longo do ensaio, conforme ilustrado no gráfico da Figura 54.

Assim, foi possível observar que existe influência dos polímeros superabsorventes nos efeitos de retração das argamassas em estudo, sobretudo até 14 dias de ensaio. Como esses materiais não promoveram efeitos negativos às argamassas relacionados à retração por secagem, e apresentaram-se como eficientes redutores de retração autógena, a sua utilização poderá contribuir positivamente em matrizes cimentícias com a utilização de ACBC em sua composição. Destaca-se que por conta do manuseio dos corpos de prova e cuidados para a não os romper,

principalmente os moldados com cimento CP III, a idade inicial de coleta da retração por secagem também foi de 24 horas após o primeiro contato do cimento com a água de amassamento. Outros estudos também apontaram a influência, mesmo que inferior do que na retração autógena, dos PSAs no ensaio de retração por secagem (YAO; ZHU; YANG, 2012; ZHENG; HAN; LIU, 2021).

Durante o ensaio de retração por secagem também foi realizado um acompanhamento das massas dos corpos de prova. Isso permitiu avaliar a diferença entre os resultados desse ensaio (sem revestimento de parafina) e o ensaio de retração autógena (com revestimento de parafina). A Figura 56 apresenta a evolução das massas dos corpos de prova ao longo do ensaio de retração por secagem.

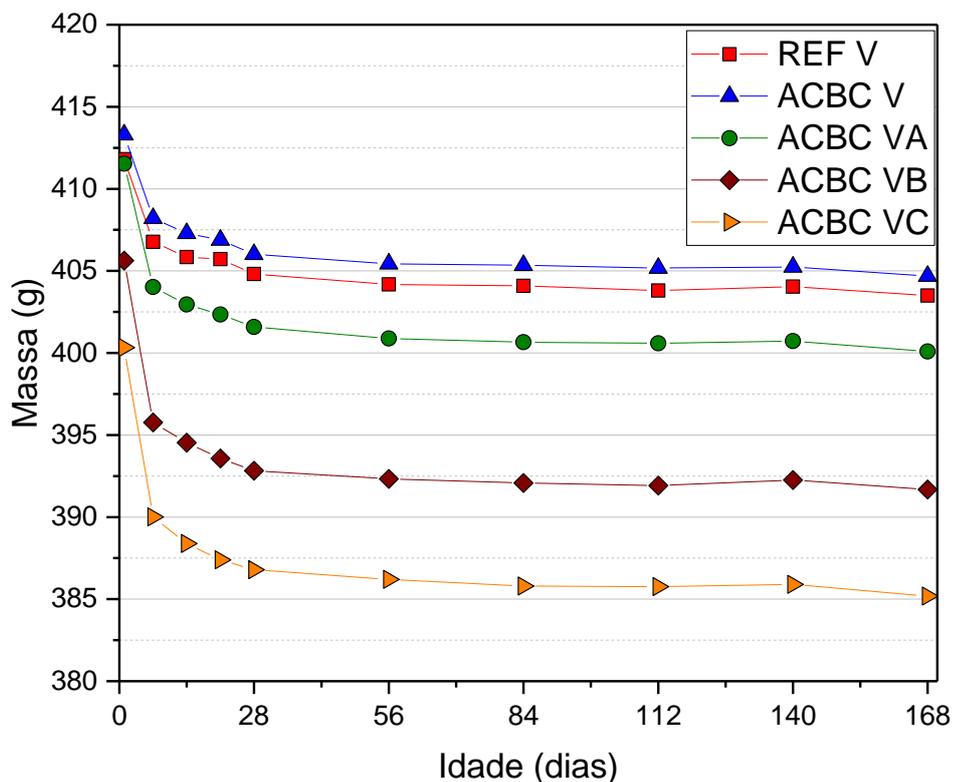


Figura 56 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração por secagem - CP V ARI

A partir dessa análise foi possível, mais uma vez, confirmar a eficiência do revestimento adotado para impedir a perda de água do interior dos corpos de prova para o ambiente, visto que durante o ensaio de retração por secagem os corpos de

prova ficaram diretamente expostos ao ambiente e, por isso, tiveram maior variação de massa se comparado ao ensaio de retração por secagem.

Foi possível notar o mesmo comportamento de redução de massa em todos os traços ao longo do ensaio de retração por secagem. Com isso, conclui-se que os polímeros superabsorventes não afetam o comportamento das massas ao longo do tempo. No entanto, o que pode-se perceber é que quanto maior a quantidade de água dos traços, menor a massa. Essa comparação pode ser realizada, uma vez que todos os corpos de prova possuíam a mesma dimensão. No ensaio de retração autógena não foi possível realizar essa comparação, pois o ensaio permite maior variação nas dimensões e conseqüentemente, massas dos CPs, uma vez que são revestidos com parafina por meio de pintura.

Por meio do gráfico apresentado na Figura 57, foi possível verificar a relação entre o percentual de redução da massa dos traços contendo ACBC em relação ao traço REF, com a relação de a/c total das misturas. Essa análise teve como objetivo identificar se essa relação exerce influência nos resultados de retração por secagem.

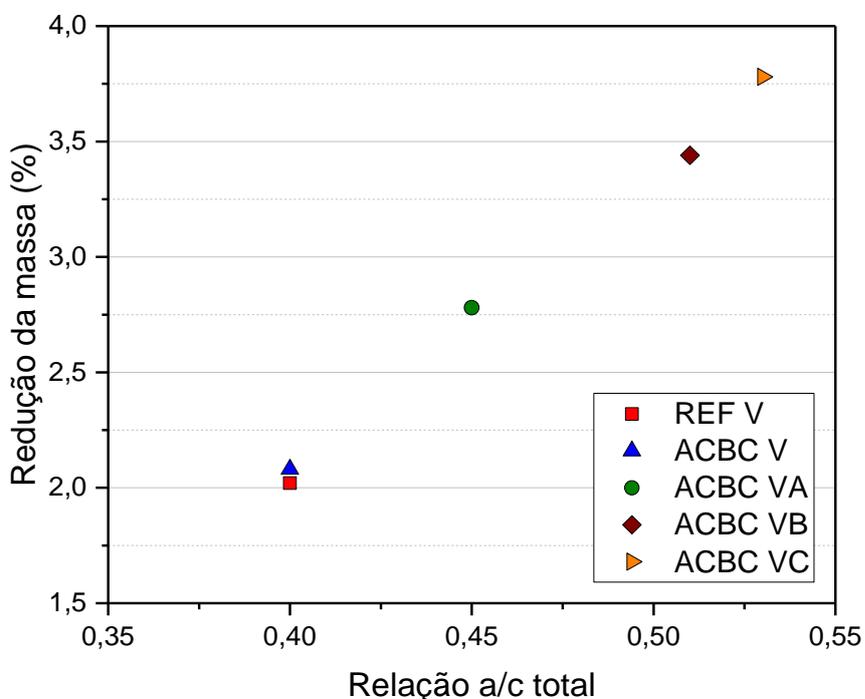


Figura 57 - Relação entre a redução da massa dos CPs do ensaio retração por secagem e a relação a/c total - CP V ARI

Analisando o gráfico é possível confirmar a maior porcentagem de redução da massa proveniente do traço com relação a/c total mais alta (ACBC VC com redução de 3,78% na massa e relação a/c total de 0,53). Inclusive, os pontos no gráfico seguem a ordem de quantidade de água total x porcentagem de redução. Assim, quanto maior a quantidade de água disponível, maior a redução da massa dos corpos de prova. E correlacionando a maior quantidade de água perdida, com a retração por secagem apresentada. O traço ACBC VC apontou os maiores valores em ambos, com 3,78% de redução na massa e 7,8% de aumento da retração por secagem se comparado ao traço com ACBC V (sem PSA). Esse resultado justifica a dificuldade de atuação dos PSAs frente à exposição direta das amostras ao ambiente.

Finalmente, essa análise confirmou perdas entre 2 e 4% o que prejudicou a atuação dos polímeros superabsorventes como agentes de cura para situações na qual os compósitos cimentícios perdem quantidades significativas de água de amassamento para o ambiente desde as idades iniciais.

5.6.2 Cimento CP III

A Figura 58 apresenta os resultados dos ensaios de retração por secagem até 168 dias do traço de referência, ACBC sem polímeros e ACBC com os polímeros A, B e C, porém, com a utilização do cimento CP III.

Analisando os resultados obtidos, o traço contendo PSA-A apresentou redução significativa da retração por secagem, de 24,78% em relação ao traço com ACBC e sem PSA. Já o traço com o PSA-B proporcionou resultados similares ao traço ACBC III (sem polímeros), com redução de 1,81%. Enquanto o traço contendo PSA-C apresentou maior retração se comparado a todos os outros (aumento de 7,80% comparado ao traço ACBC III). Desta forma, comparando os traços com polímeros superabsorventes, é possível notar que quanto maior a quantidade de água de amassamento total da mistura, maior foi o efeito da retração por secagem. E esse fator está diretamente relacionado a perda de água para o ambiente por conta da exposição direta dos corpos de prova. A maior quantidade de água promoveu maiores

efeitos relacionados a mudança de dimensão dos corpos de prova, desencadeando maior retração por secagem.

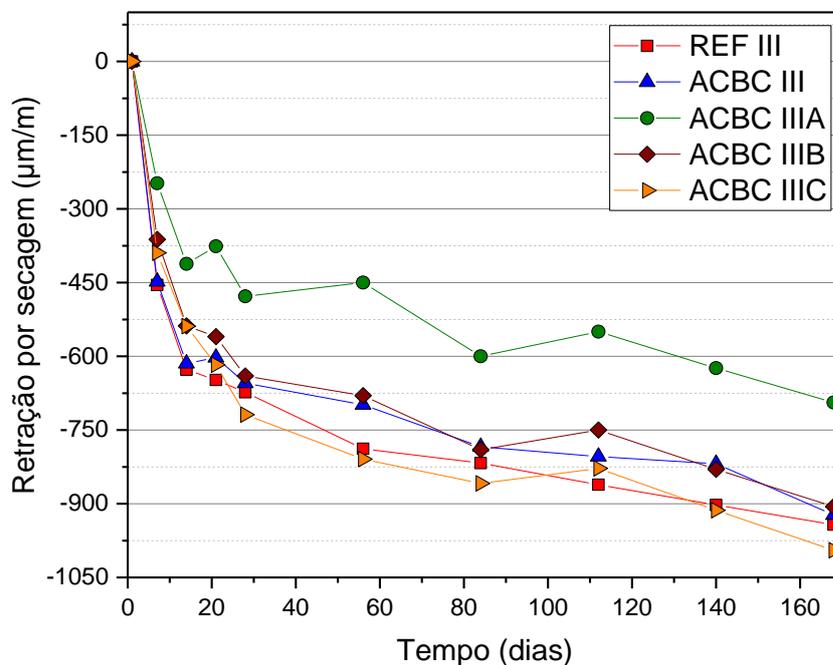


Figura 58 - Retração por secagem até 168 dias com diferentes polímeros superabsorventes - CPIII

Mesmo assim, a exemplo dos resultados do ensaio com cimento CP V ARI, neste ensaio, com exceção do PSA-A, não houve influência significativa dos polímeros superabsorventes na atuação como agentes de cura. Destaca-se mais uma vez a exposição direta dos corpos de prova ao ambiente, o que maximiza a perda de água reservada para a liberação conforme a necessidade da mistura durante a hidratação dos componentes no processo de cura da argamassa. É possível que esse seja um dos principais motivos pelo qual os polímeros absorventes perdem parte de sua eficiência.

Analisando os efeitos da ACBC nesse ensaio, foi possível notar que a mesma não promove efeitos negativos relacionados à retração por secagem, uma vez que apresentou resultados similares ao traço de referência. Apesar de promover a densificação da matriz cimentícia, observou-se que a ACBC sem polímeros promoveu

uma redução, mesmo que pequena (de 2,12%), na retração por secagem se comparada ao traço referência (REF III), ao longo do ensaio. Esse comportamento valida a utilização da ACBC em substituição aos agregados miúdos sem o comprometimento das matrizes cimentícias, no que diz respeito a retração por secagem, contribuindo com a destinação dos resíduos e minimização da escassez de recursos naturais.

Da mesma maneira em que foi realizado para os traços com cimento CP V ARI, também foi realizada a ANOVA para cada conjunto de médias em cada idade dos traços com cimento CP III (nível de significância de $\alpha = 5\%$). Os resultados estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Retração por secagem - CP III)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	2,07464E-07	74,73364929
14	3,78121E-07	65,94776715
21	1,3073E-09	211,0224629
28	8,6761E-10	229,3041363
56	1,33965E-11	531,8584687
84	1,64438E-10	320,9510086
112	1,44533E-13	1320,134615
140	1,79288E-11	501,5808581
168	1,32472E-11	533,0585106

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

A ANOVA confirmou que houve diferença significativa em todas as idades avaliadas, inclusive com valores expressivos de F. O que pode ter maior influência sobre esse resultado é o traço ACBC IIIA, por conta da maior redução da retração por secagem, e, conseqüentemente, maior distanciamento dos outros traços avaliados.

No entanto, para comprovar esse fato estatisticamente, foi realizado o Teste de Tukey, o qual tem seus resultados apontados na Tabela 26.

Tabela 26 - Teste de Tukey para as médias de retração por secagem (CP III)

Traço/Idade (dias)	7	14	21	28	56	84	112	140	168
REF III x ACBC III	≈	≈	≠	≈	≠	≠	≠	≠	≈
REF III x ACBC IIIA	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
REF III x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
REF III x ACBC IIIC	≠	≠	≈	≠	≈	≠	≠	≈	≠
ACBC III x ACBC IIIA	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≈	≈	≈	≠	≈	≈
ACBC III x ACBC IIIC	≠	≠	≈	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIA x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIA x ACBC IIIC	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIB x ACBC IIIC	≈	≈	≠	≠	≠	≠	≠	≠	≠

De fato, o traço ACBC IIIA apresentou diferença significativa com relação a todos os outros traços em todas as idades, a qual está atrelada ao seu potencial para minimização da retração por secagem. Por outro lado, os traços com maior similaridade estatisticamente, em termos da retração por secagem, foram os traços ACBC III e ACBC IIIB, os quais apresentaram diferença significativa em quatro das nove idades avaliadas, sendo essa diferença situada, principalmente nas primeiras idades.

Para melhor compreensão do comportamento da retração por secagem nas idades iniciais, também foi realizado um recorte dos resultados até 14 dias para os corpos de prova confeccionados com CP III os quais estão apresentados na Figura 59.

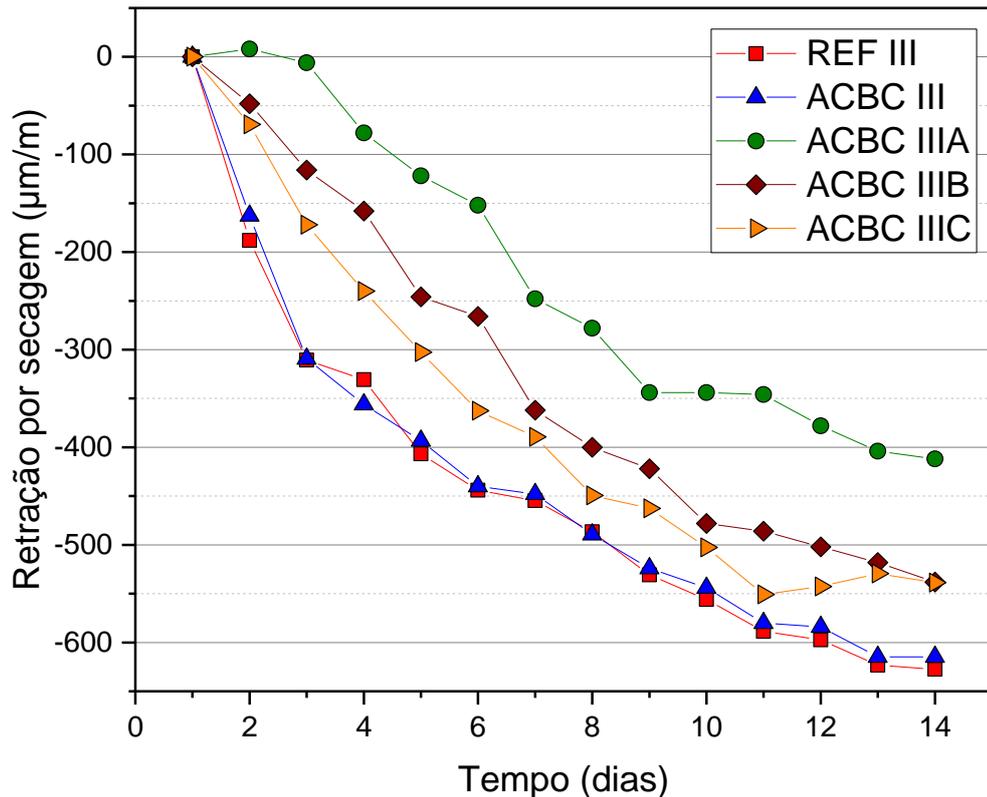


Figura 59 - Análise da retração por secagem nas idades iniciais (até 14 dias) – CP III

Observando os resultados até 14 dias, foi possível notar uma redução na retração por secagem, mesmo que pequena, nos traços contendo polímeros superabsorventes. O PSA-A foi quem teve melhores resultados, seguido do PSA-B e, por último, o PSA-C. Apesar de possuírem maiores quantidades de água em decorrência da capacidade de absorção de cada polímero superabsorvente, eles apresentaram menores valores de retração por secagem até 14 dias, em relação aos traços sem polímeros (REF e ACBC). Esse efeito valida a utilização dos PSAs como agentes de cura que promovem uma minimização da suscetibilidade à fissuração em decorrência da retração por secagem, mesmo que em proporções inferiores em relação à retração autógena.

Para misturas com o cimento CP III também foi realizado um acompanhamento das massas dos corpos de prova para fins de comparação com o ensaio de retração autógena e validação do revestimento de parafina utilizado no estudo. Os resultados dessa análise estão apresentados na Figura 60.

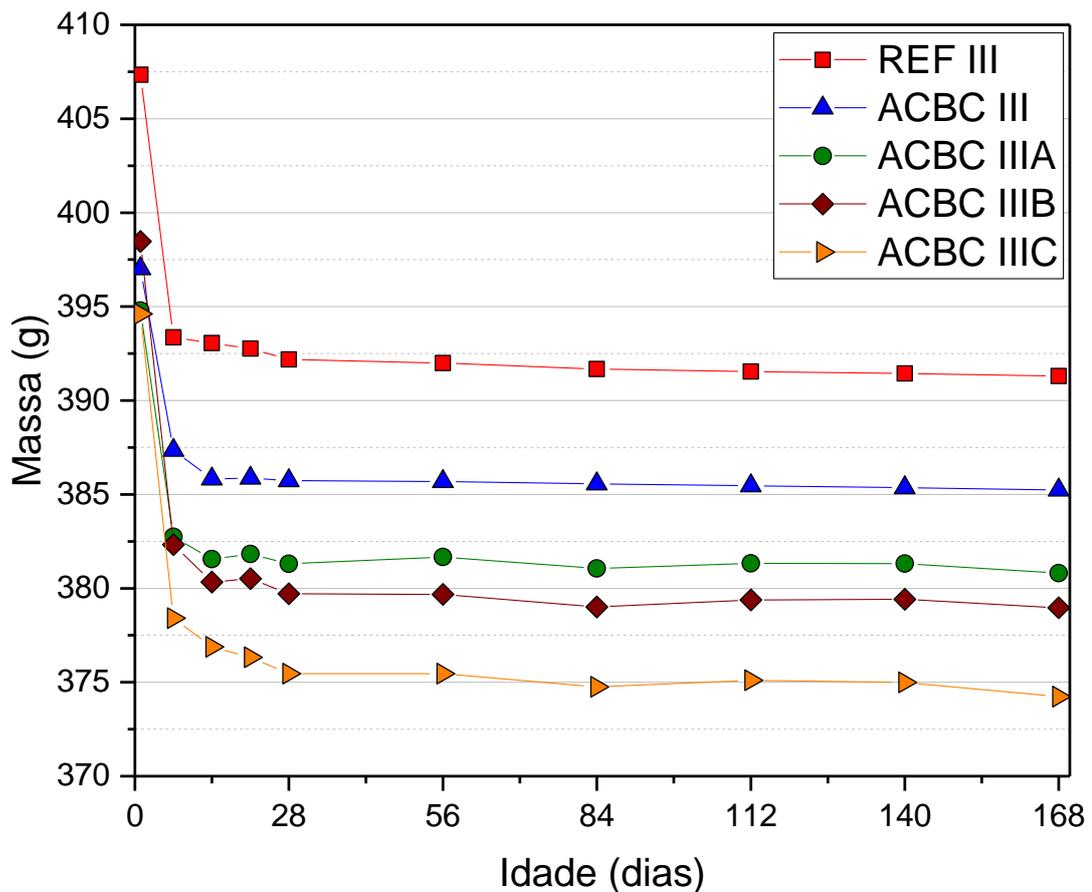


Figura 60 - Evolução das massas dos CPs durante ensaio de retração por secagem - CP III

Esses resultados também ilustraram a diferença de corpos de prova não revestidos e corpos de prova evolvidos com parafina. Apresentaram grande variação de massa ao longo do ensaio. E comparando os traços também foi possível notar valores de massa inversamente proporcionais a quantidade de água utilizada, com exceção dos CPs sem polímeros superabsorventes, os quais foram confeccionados com mesmas relações entre água e aglomerante ($a/c = 0,4$). No entanto, a fim de entender a relação entre a redução da massa e a relação a/c total, o gráfico da Figura 61 foi elaborado.

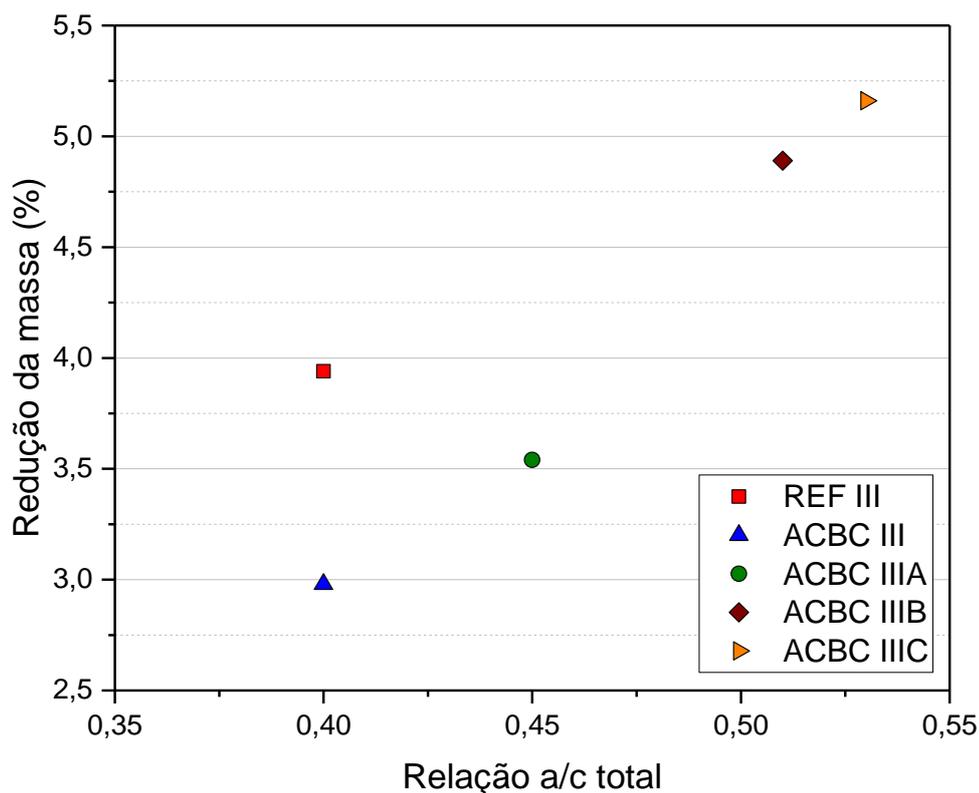


Figura 61 - Relação entre a redução da massa dos CPs do ensaio retração por secagem e a relação a/c total - CP III

Assim como ocorreu no ensaio de retração por secagem utilizando o cimento CP V ARI, com o cimento CP III o traço que apresentou maior redução percentual de massa, também era o que possuía maior quantidade de água disponível para evaporar (ACBC IIIC, com redução da massa na proporção de 6,16% e relação a/c total de 0,53). E correlacionando com o resultado de retração, este também foi o traço que apresentou maior retração por secagem aos 168 dias (proporcionando um aumento de 7,8%), muito por conta dessa quantidade elevada de água disponível, se comparado com os outros traços, o que favoreceu o encolhimento dos corpos de prova.

Ainda com relação ao gráfico apresentado, percebeu-se que, sem considerar o traço REF, quanto maior a quantidade de água nos traços, maior a redução da massa, mesmo que parte dessa água era destinada ao PSA, conforme a sua capacidade de absorção. Esse fator corrobora com menor eficiência dos PSAs, já mencionada, ao

longo do ensaio de retração por secagem, por conta da exposição direta das argamassas ao ambiente.

5.6.3 Cimento CP V ARI vs cimento CP III

Como realizado no ensaio de retração autógena, a fim de comparar os resultados dos ensaios dos dois cimentos e fornecer um panorama geral dos polímeros superabsorventes utilizados neste estudo, a Figura 62 apresenta os resultados de retração por secagem de todos os traços avaliados no presente estudo.

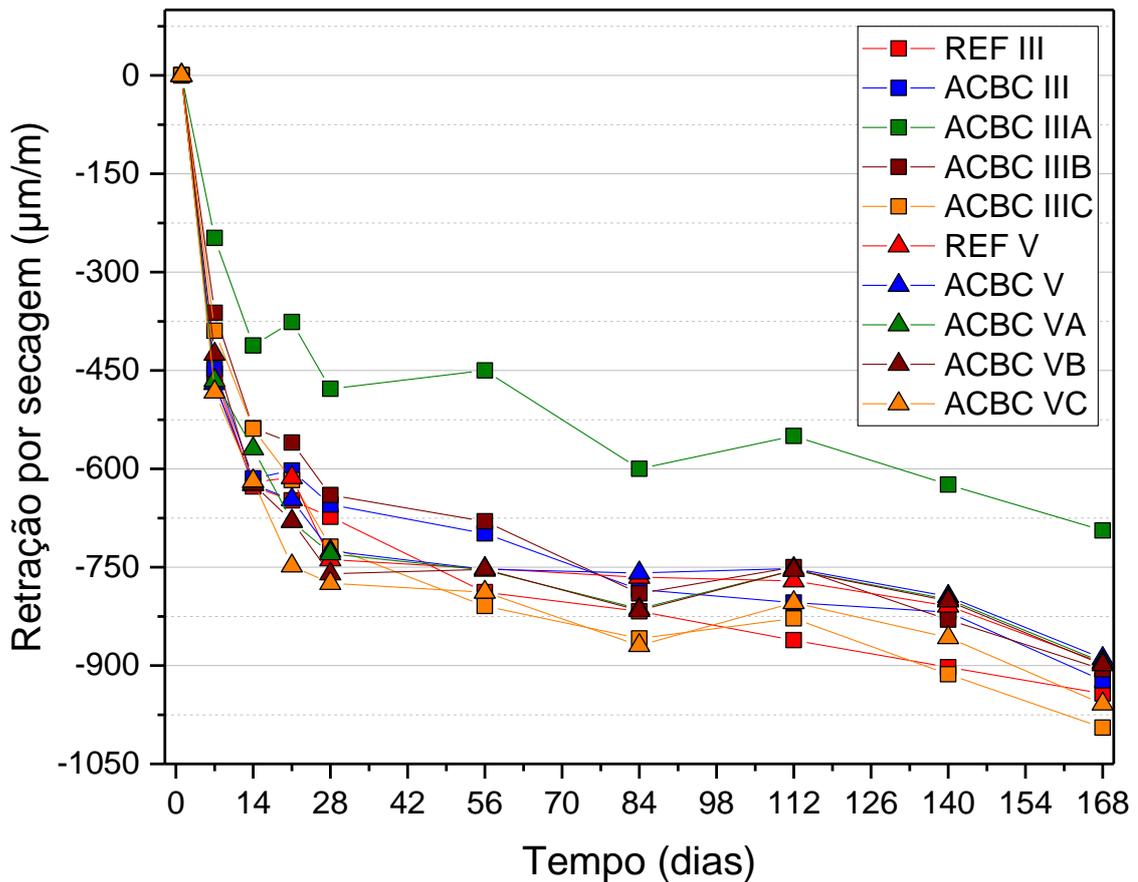


Figura 62 - Comparação da retração por secagem até 168 dias dos cimentos CP V ARI e CP III

Os traços representados pelo símbolo de um quadrado correspondem ao traço com cimento CP III, enquanto os representados pelo símbolo de um triângulo fazem referência aos corpos de prova moldados com cimento CP V ARI. Cada cor segue a representação apresentada no Programa Experimental e utilizada ao longo do estudo para identificar os traços abordados.

Comparando todos os traços graficamente, notou-se a maior redução da retração por secagem por conta do traço contendo o polímero PSA-A junto ao cimento CP III. Como já mencionado, isso se deve por conta da menor quantidade de água disponível para perda ao ambiente devido a exposição direta dos corpos de prova. No entanto, esse traço possui relação a/c total de 0,45, enquanto os traços de referência e ACBC sem polímeros 0,40. Assim, atribui-se essa redução da retração por secagem à presença do PSA-A e sua atuação em conjunto com a mistura contendo CP III.

Com base nos resultados do gráfico, foi possível elaborar a Tabela 27, a qual apresenta as porcentagens de redução/aumento da retração por secagem de cada traço contendo PSA e ACBC em comparação ao traço contendo seu respectivo cimento, com ACBC e sem a presença de PSA (ACBC V e ACBC III).

Tabela 27 - Porcentagens de redução da retração por secagem dos traços com cimento CP V ARI e CP III

Traço	Redução da retração por secagem	Aumento da retração por secagem
ACBC VA	-	0,60%
ACBC VB	-	1,05%
ACBC VC	-	7,80%
ACBC IIIA	24,78%	-
ACBC IIIB	1,81%	-
ACBC IIIC	-	7,80%

Nota: A porcentagem de redução foi calculada com relação aos traços ACBC V e ACBC III, conforme o tipo de cimento utilizado.

Como já mencionado anteriormente, no ensaio de retração por secagem houve menor influência dos PSA sobre os efeitos de retração. No entanto, por meio da comparação entre todos os traços, foi possível notar, assim como durante o ensaio de retração autógena, maior efeito dos polímeros sobre os corpos de prova moldados com cimento CP III, em especial, com o PSA-A. Mais uma vez, vale mencionar a possibilidade desse fator estar atrelado a diferente finalidade de cada cimento e, conseqüentemente, reações de hidratação em velocidades distintas.

Também por conta da baixa influência dos PSA no desenvolvimento deste ensaio, notou-se resultados mais próximos comparando os dois tipos de cimento, tendo apenas o traço com polímero A e cimento CP III, se destacado em termos da redução da retração por secagem (com redução de 24,78%). Salieta-se que esse traço, além de possuir menor quantidade de água adicional, foi moldado com cimento CP III, material no qual apresentou maior redução da retração autógena, como já explanado. E considerando a retração por secagem, foi visto que os traços com maiores quantidades de água tiveram maiores valores de retração por secagem. Esse efeito pode ser atribuído à exposição direta dos corpos de prova ao ambiente e, tendo maior quantidade de água disponível para ser perdida ao ambiente, aumentam se as possibilidades de retração por secagem desses corpos de prova.

5.7 Propriedades mecânicas

Nesta seção estão apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão e resistência à tração na flexão, além dos resultados a serem obtidos em função da análise microestrutural das amostras rompidas.

5.7.1 Resistência à tração na Flexão (CP V ARI)

A resistência à tração na flexão é uma propriedade mecânica que pode sofrer influências dos diferentes materiais adicionados aos traços. A Tabela 28 apresenta as

médias dos resultados de resistência à tração na flexão de cada traço nas idades de rompimento pré-estabelecidas, e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 28 - Médias e desvios padrões de resistência à tração na flexão (CP V ARI)

Traço	7 dias	14 dias	28 dias	84 dias	168 dias
	Média - Desvio Padrão (MPa)				
REF V	7,37 ± 1,01	10,70 ± 0,25	10,98 ± 1,08	11,20 ± 0,29	11,31 ± 0,21
ACBC V	8,17 ± 0,65	11,26 ± 0,21	11,37 ± 0,63	11,63 ± 0,88	11,68 ± 0,19
ACBC VA	6,70 ± 0,45	11,73 ± 0,38	11,47 ± 0,26	11,58 ± 0,97	11,66 ± 0,16
ACBC VB	5,91 ± 0,68	10,34 ± 0,45	11,03 ± 0,72	11,06 ± 0,32	11,10 ± 0,08
ACBC VC	6,36 ± 0,21	10,63 ± 0,23	10,89 ± 0,43	11,18 ± 0,12	11,19 ± 0,34

Para facilitar a comparação dos resultados a Figura 63 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos de prova moldados com cimento CP V ARI por meio de um gráfico.

Neste ensaio, com 7, 84 e 168 dias o traço com ACBC sem polímeros apresentou maior resistência à tração na flexão. Já nas outras idades estudadas, o traço ACBC VA foi quem teve melhor desempenho nesse quesito. Ao longo de todo ensaio, ACBC VB e ACBC VC apresentaram menores valores de resistência à tração na flexão, com resultados similares ao REF, com exceção à resistência aos 7 dias. Como os PSA necessitam de quantidades de água adicionais, houve essa diferença de valores de resistência. Ao longo do processo de endurecimento das misturas, ocorre a dessorção de água dos PSAs, resultando no colapso desses polímeros, o que pode modificar a microestrutura formada pelos produtos hidratados. Essa diferença de um traço convencional faz com que eles apresentem maior porosidade e, conseqüentemente, menor desempenho no que diz respeito aos ensaios mecânicos nas primeiras idades.

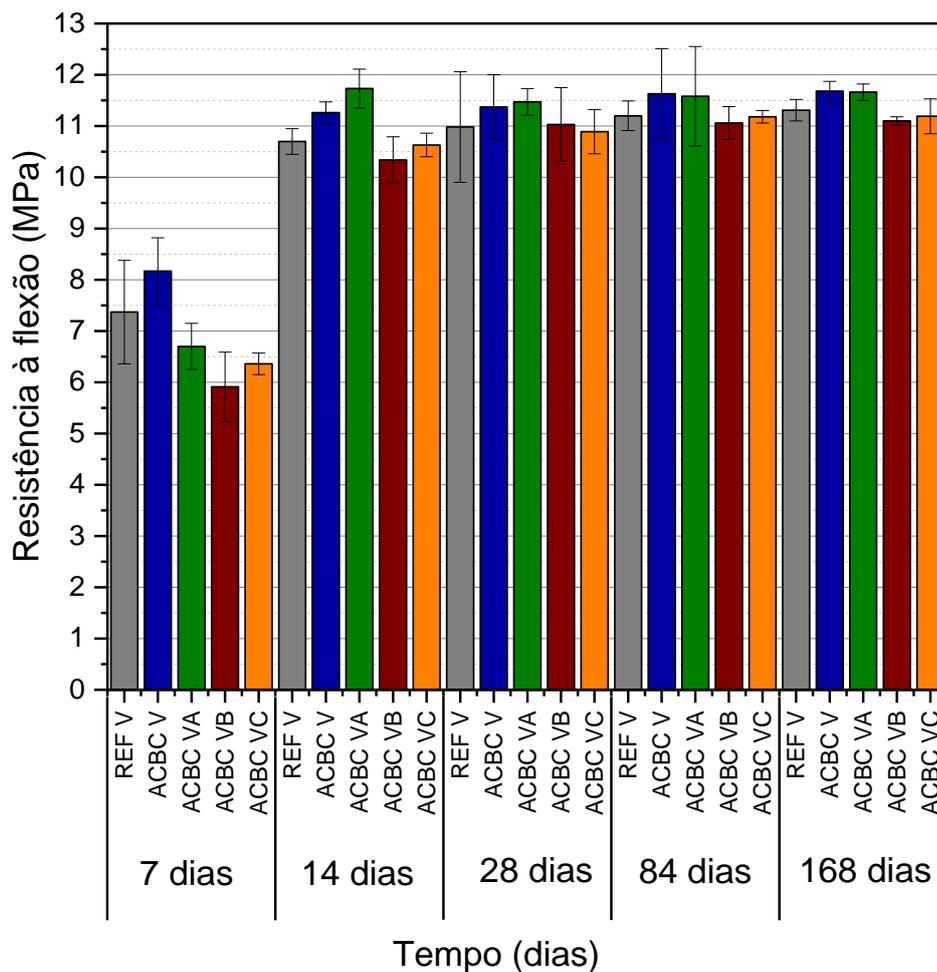


Figura 63 - Resultados de resistência à tração na flexão dos traços com cimento CP V ARI

No entanto, conforme o ensaio avançou, e as reações de hidratação aconteceram, e todos os traços apresentaram um acréscimo em sua resistência e maior similaridade entre os resultados performados, inclusive na presença de PSA. Esse efeito pode ser atribuído aos produtos hidratados que ocupam parte dos poros formados pelo colapso dos PSAs. Assim, é possível afirmar que a utilização de polímeros superabsorventes em compósitos cimentícios não afeta a resistência à tração na flexão. Apenas nas primeiras idades ocorre uma diferença significativa entre os resultados de resistência à tração na flexão, a qual é minimizada em médio e longo prazo.

A fim de avaliar se a diferença entre os resultados era significativa estatisticamente, foi realizada a análise de variância para cada conjunto de médias em cada idade. Foi considerado um nível de significância α de 5%, com isso, os

resultados forneceram 95% de confiança. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à tração na flexão - CP VARI)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	0,013328657	5,486543392
14	0,002256439	9,134487913
28	0,785041002	0,428579647
84	0,725633693	0,51668344
168	0,020238008	4,796856553

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

Analisando os valores de F para cada idade foi possível notar que nas idades de 28 e 84 dias os resultados de resistência à tração na flexão não apresentaram diferença significativa, podendo então ser considerados, estatisticamente, semelhantes. Aos 168 dias a diferença entre o valor de F e o F crítico também não foi tão expressiva. Portanto, pode-se afirmar que os polímeros superabsorventes não afetaram negativamente a resistência à tração na flexão das matrizes cimentícias estudadas.

Como houve diferença significativa apontada pela análise de variância nas idades de 7, 14 e 168 dias, foi necessário averiguar quais médias possuíam diferença significativa, por meio do Teste de Tukey por pares. Os resultados obtidos por meio dessa análise estão apresentados na Tabela 30. Os pares que apresentaram diferença significativa entre si estão simbolizados com “≠”, enquanto os resultados similares estão representados por “≈”.

Tabela 30 - Teste de Tukey para as médias das resistências à flexão (CP V ARI)

Traço/Idade (dias)	7	14	28	84	168
REF V x ACBC V	≈	≈	≈	≈	≈
REF V x ACBC VA	≈	≠	≈	≈	≈
REF V x ACBC VB	≈	≈	≈	≈	≈
REF V x ACBC VC	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC V x ACBC VA	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC V x ACBC VB	≠	≠	≈	≈	≠
ACBC V x ACBC VC	≠	≈	≈	≈	≈
ACBC VA x ACBC VB	≈	≠	≈	≈	≈
ACBC VA x ACBC VC	≈	≠	≈	≈	≈
ACBC VB x ACBC VC	≈	≈	≈	≈	≈

Com esses resultados foi possível notar que o que fez com que existisse diferença significativa entre os traços na idade de 168 dias foi a diferença encontrada entre os resultados de resistência à tração na flexão entre os traços ACBC V e ACBC VB. No restante dos traços na idade de 168 dias não houve diferença entre os pares analisados. Aos 14 dias foi obtida a maior quantidade resultados com diferença significativa entre os pares, tendo essas diferenças sido proporcionadas pelos traços contendo polímeros superabsorventes. Porém, essa diferença já não foi encontrada aos 28 dias. Por fim, a comparação que apresentou mais idades com diferença significativa foi entre os traços ACBC V (sem PSA) e ACBC VB, uma vez que representam os extremos de maior e menor resistência à tração na flexão em diversas idades.

5.7.2 Resistência à Compressão (CP V ARI)

A resistência à compressão também é uma propriedade mecânica que pode sofrer influência dos diferentes materiais adicionados aos traços. A Tabela 31

apresenta as médias dos resultados de resistência à compressão de cada traço nas idades de rompimento pré-estabelecidas, e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 31 - Médias e desvios padrões de resistência à compressão (CP V ARI)

Traço	7 dias	14 dias	28 dias	84 dias	168 dias
	Média - Desvio Padrão (MPa)				
REF V	61,52 ± 1,6	61,44 ± 1,14	62,46 ± 2,99	65,67 ± 2,32	67,08 ± 2,47
ACBC V	68,03 ± 2,09	68,11 ± 1,8	67,12 ± 2,34	70,44 ± 2,02	68,05 ± 2,54
ACBC VA	59,18 ± 0,44	65,21 ± 1,17	63,42 ± 1,4	65,94 ± 1,92	63,59 ± 1,65
ACBC VB	48,36 ± 1,33	55,67 ± 1,96	55,09 ± 1,07	58,98 ± 1,52	55,21 ± 0,98
ACBC VC	49,60 ± 0,93	58,50 ± 2,06	58,00 ± 1,55	59,30 ± 2,53	57,91 ± 1,31

A fim de, mais uma vez, facilitar a comparação dos resultados a Figura 64 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova moldados com cimento CP V ARI por meio de um gráfico.

É possível perceber que cada traço apresenta uma tendência de aumento de resistência com o avanço das idades do ensaio, até 84 dias. No entanto, entre 84 e 168 dias houve um decréscimo de resistência. Essa diminuição pode estar relacionada aos efeitos expansivos proporcionados pelos polímeros superabsorventes durante as reações de hidratação das misturas. O traço com ACBC sem polímeros foi o que apresentou maior resistência à compressão em todas as idades, inclusive sendo um dos traços a apresentar valores superiores ao traço de referência. Esse resultado também foi obtido por Almeida e outros (2015) em seu estudo, quando avaliaram as propriedades mecânicas de compósitos cimentícios com incorporação de areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar. Os autores vincularam esse resultado ao fato da ACBC promover maior densificação da matriz cimentícia frente à misturas convencionais. A incorporação da ACBC pode reduzir a quantidade de poros da argamassa com diâmetros menores (abaixo de 150 µm) devido ao menor tamanho de partícula desse agregado alternativo. Isto indica um possível efeito de empacotamento da ACBC na argamassa.

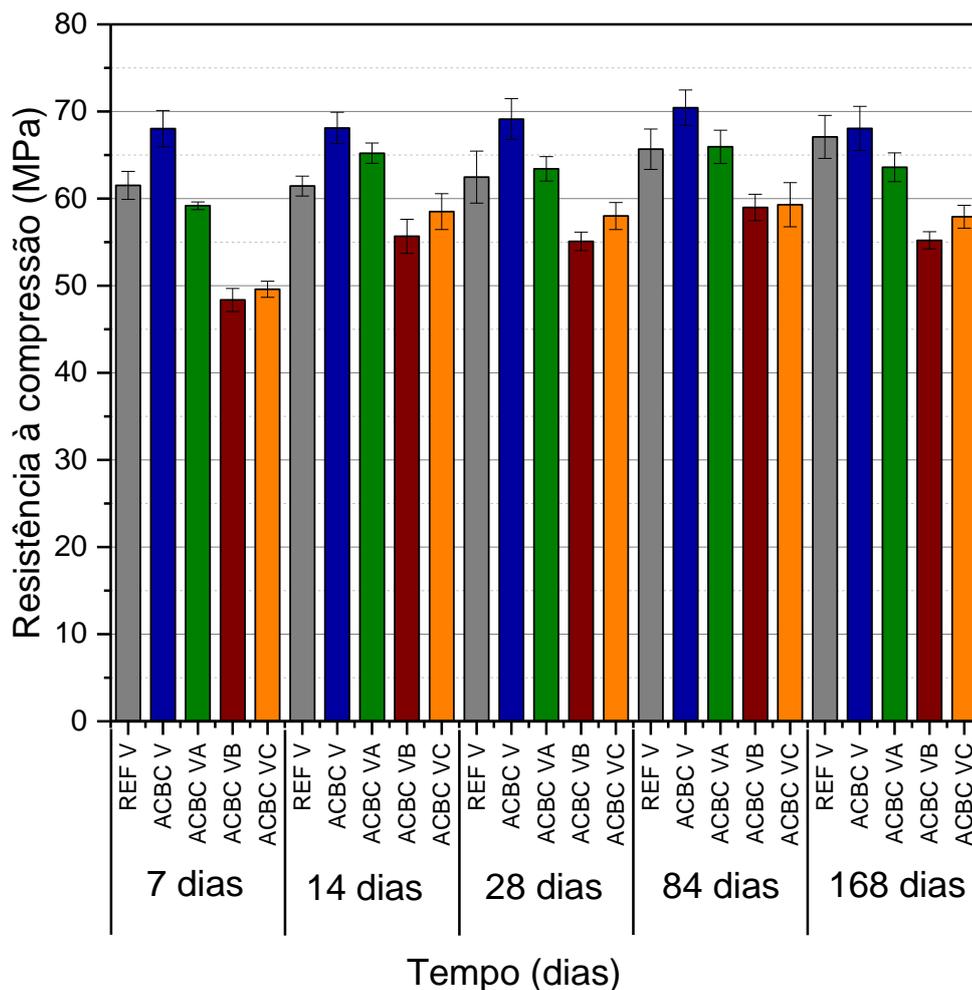


Figura 64 - Resultados de resistência à compressão dos traços com cimento CP V ARI

O traço com a ACBC e utilização do PSA-A também apresentou valores de resistência à compressão superiores ao traço referência nas idades de 14, 28 e 84 dias. Em todas idades o traço com o PSA-B apresentou os menores valores de resistência à compressão. Com a adição do polímero “B” ocorreu uma redução de aproximadamente 29%, 18%, 18%, 16% e 19% nas idades de 7, 14, 28, 84 e 168 dias, respectivamente, com relação ao traço com ACBC sem polímeros (ACBC V). Os dois traços com maior redução na resistência à compressão com relação ao traço com ACBC e sem polímeros foram ACBC VC e ACBC VB, nesta ordem. Essa maior redução pode ser atribuída a maior quantidade de água adicional necessária (0,13 e 0,11 em relação ao aglomerante) para que a consistência desses traços atingisse valores próximos aos outros. Isso ocorre por conta das diferentes capacidades de

absorção de cada polímero utilizado no presente estudo, as quais foram analisadas por meio do método de *tea-bag* e apresentadas na seção 5.1 junto a Figura 33.

Craeye, Geirnaert e Schutter (2011) obtiveram como resultado a redução de 28% na resistência à compressão proveniente do traço com o PSA de maior capacidade de absorção aos 28 dias, resultado semelhante ao obtido no presente estudo, mesmo que sem a utilização da ACBC na composição dos traços.

Para o ensaio de resistência à compressão também foi realizada análise de variância a fim de averiguar se a diferença entre os resultados era significativa estatisticamente. Também foi considerado um nível de significância α de 5%, com os resultados fornecendo 95% de confiança. A Tabela 32 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 32 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à compressão - CP V ARI)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	6,73019E-19	212,088961
14	6,86149E-12	53,4328649
28	6,11949E-11	43,76464876
84	1,3495E-09	32,6815443
168	7,35187E-12	53,10133544

Nota: O valor de F crítico foi de 2,759.

Com base na ANOVA proveniente dos conjuntos de resultados de resistência à compressão notou-se a diferença significativa em todas as idades do ensaio, uma vez que todos os valores de F ficaram acima do F crítico. No entanto, para identificar quais traços tiveram mais influência sobre os resultados, foi realizado o teste de Tukey por pares (Tabela 33).

Tabela 33 - Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão (CP V ARI)

Traço/Idade (dias)	7	14	28	84	168
REF V x ACBC V	≠	≠	≠	≠	≈
REF V x ACBC VA	≈	≠	≈	≈	≠
REF V x ACBC VB	≠	≠	≠	≠	≠
REF V x ACBC VC	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC V x ACBC VA	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC V x ACBC VB	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC V x ACBC VC	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC VA x ACBC VB	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC VA x ACBC VC	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC VB x ACBC VC	≈	≈	≈	≈	≈

Apesar da diferença significativa apontada pela ANOVA, por meio do Teste de Tukey foi possível identificar que os traços ACBC VB e ACBC VC não apresentaram diferença significativa. Com exceção a esse resultado, apenas na comparação entre os traços REF V e ACBC V, e entre os traços REF V ACBC VA houve pelo menos uma idade sem diferença significativa entre os resultados. Essa análise estatística comprova a influência dos polímeros superabsorventes na resistência à compressão, considerando a utilização do cimento CP V ARI.

Zheng, Han e Liu (2021) concluíram em seu estudo que a resistência à compressão, a resistência à tração na flexão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração por fissuração são inversamente proporcionais à quantidade de PSA incorporados às misturas. Sendo assim, existe certa influência dos polímeros superabsorventes nas propriedades mecânicas de argamassas/concretos. Outros estudos também obtiveram resultados semelhantes (BEUSHAUSEN; GILLMER; ALEXANDER, 2014; CHINDASIRIPHAN; YOKOTA; PIMPAKAN, 2020; SONG; CHOI; CHOI, 2016; YAO; ZHU; YANG, 2012). No entanto, Pourjavadi e outros (2013) afirmam que os PSA são prejudiciais apenas quanto à resistência à tração na flexão por conta de uma possível densificação do gel C-S-H na presença desses materiais,

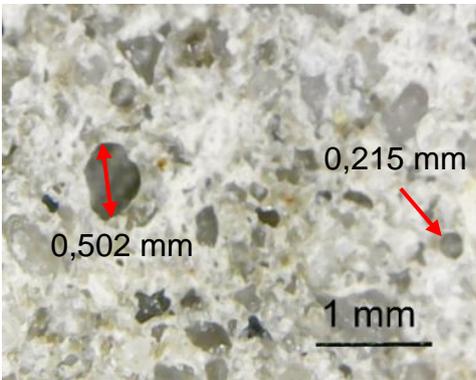
diferente do que ocorreu no presente estudo. Isso ocorreu por conta da ausência de água adicional nas misturas. Outros autores alegaram que a resistência à compressão só é prejudicada quando existe água adicional nas misturas (BOSHOF *et al.*, 2020; SNOECK *et al.*, 2014).

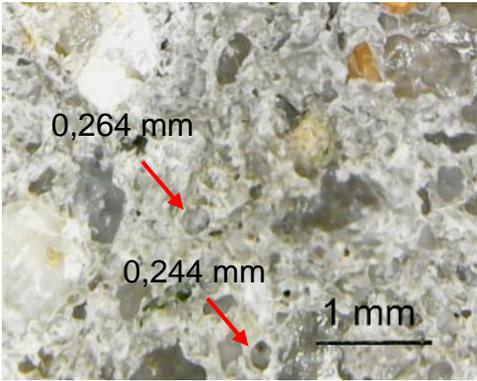
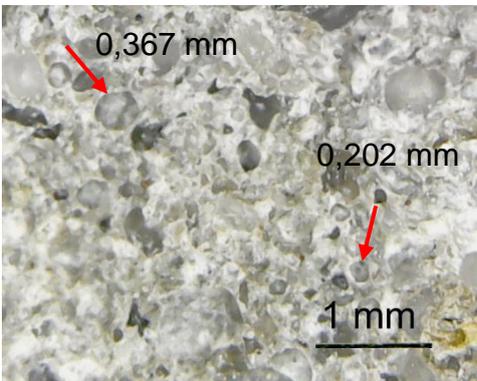
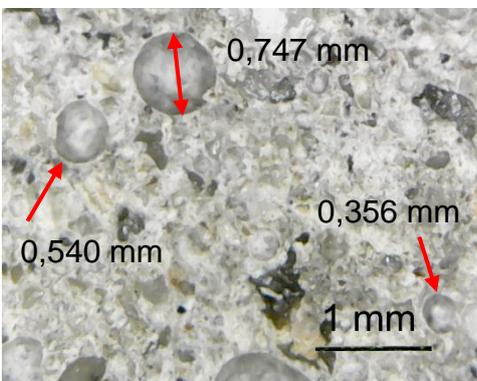
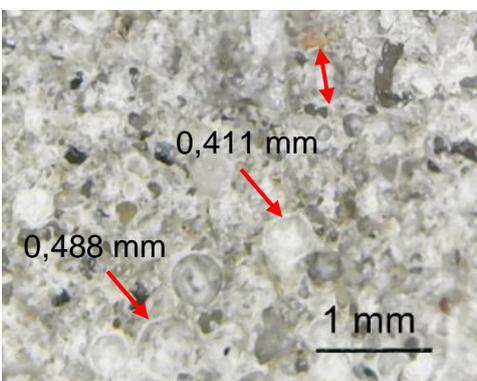
A norma NBR 6118 (ABNT, 2014) exige que a resistência à compressão alcance no mínimo 20 MPa em ambientes com classe de agressividade I. E mesmo apresentando redução na resistência à compressão, os traços ainda proporcionaram resistências acima de 50 MPa após 28 dias, viabilizando a utilização das misturas para fins estruturais ou não estruturais. Com isso, destaca-se a possibilidade de utilização dos polímeros superabsorventes sem o comprometimento significativo do produto final no que diz respeito a resistência à compressão de compósitos cimentícios com cimento CP V ARI.

5.7.3 Análise microestrutural (CP V ARI)

Após o rompimento dos corpos de prova no ensaio de resistência à compressão na idade de 168 dias, foi realizada uma análise da microestrutura por meio de microscópio óptico. A Tabela 34 apresenta as imagens obtidas com ampliação de 1000x. O tratamento das imagens foi realizado por meio do *software ImageJ*.

Tabela 34 - Análise microestrutural por microscopia óptica (1000x) - CP V ARI

Traço	Microscopia aos 168 dias
REF V Fração porosa: 38,50%	

Traço	Microscopia aos 168 dias
<p>ACBC V</p> <p>Fração porosa: 34,89%</p>	
<p>ACBC VA</p> <p>Fração porosa: 41,97%</p>	
<p>ACBC VB</p> <p>Fração porosa: 44,13%</p>	
<p>ACBC VC</p> <p>Fração porosa: 44,41%</p>	

As setas e círculos pontilhados indicam poros formados pela presença de água e posterior evaporação. Comparando o traço de referência ao com ACBC e sem polímeros, notou-se que uma quantidade mais pronunciada de poros na amostra branca, chegando a 0,502 mm de extensão, confirmada pela análise da fração porosa dos traços, a qual apontou 38,50% para o traço REF V e 34,89% para o ACBC V. Isso se deve à densificação promovida pela presença de ACBC, substituindo parte do agregado miúdo da argamassa. Por meio do tratamento das imagens também foi possível identificar cavidades provenientes da evaporação de água ou pelo ar confinado ao longo do processo de mistura. Foram identificados espaços mais extensos (de até 0,747 mm) na presença dos PSAs, o que pode afetar a resistência à compressão apresentada anteriormente. A Figura 65 apresenta a relação entre a fração porosa e a relação a/c total de cada traço.

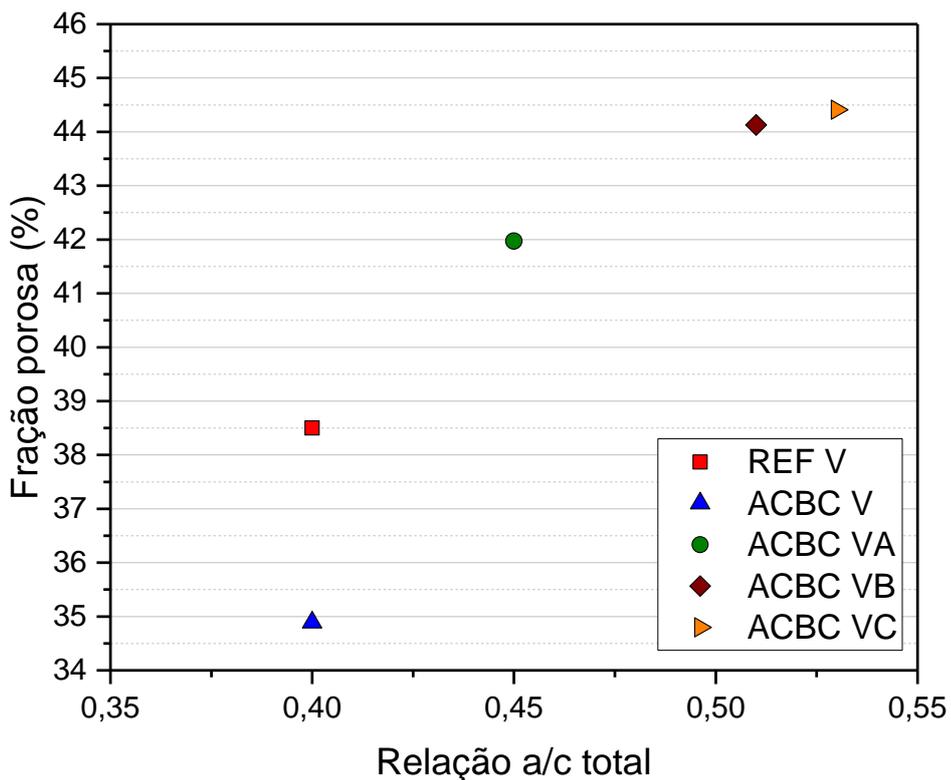


Figura 65 - Relação entre a fração porosa e a proporção a/c total - CP V

Com base na análise visual das microscopias, confirmada pelas frações porosas obtidas e análise gráfica, foi possível notar também que, se comparados os traços com polímeros superabsorventes ao traço com ACBC, mas sem polímeros, os traços com PSAs B e C aparentam possuir poros maiores e em maior quantidade (de até 0,747 mm). A fração porosa obtida por meio do software ImageJ confirma esse resultado, apontando valores de 41,97%, 44,13% e 44,41% para os traços ACBC A, B e C, respectivamente, frente à fração porosa de 34,89% do traço ACBC V. Esse efeito é promovido pela presença de maiores quantidades de água de amassamento, devido a suas maiores capacidades de absorção e necessidade para manter a consistência pré-estabelecida no início do estudo. Além disso, quando ocorre o colapso dos PSAs, após a liberação da água, conforme a necessidade das reações de hidratação ocorrentes na argamassa, acontece um aumento na porosidade das matrizes cimentícias, confirmado por outros pesquisadores (MECHTCHERINE *et al.*, 2021; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021; WYRZYKOWSKI *et al.*, 2018) . Essa porosidade superior corrobora com os resultados dos ensaios mecânicos, nos quais os traços com maiores quantidades de água total obtiveram desempenho, mesmo que não prejudicial, inferior. Por fim, observou-se que quanto maior a quantidade de água da mistura, maior a fração porosa, fator atribuído tanto à maior água disponível para formação de espaços vazios conforme ela é perdida, como pela presença dos PSAs, os quais aumentam a porosidade após o colapso e liberação da água à mistura.

Pourjavadi e outros (2013) apresentaram como principais alterações na microestrutura da pasta na presença de PSA, uma morfologia mais densa do gel C-S-H. A água adicional considerada nas misturas pode garantir a microestrutura global dos traços estudados e eventuais problemas devido à perda de trabalhabilidade (SNOECK *et al.*, 2014). Isso faz com que o aumento da porosidade não faça com que essas matrizes cimentícias não possam ser utilizadas na construção civil. Houve estudos na qual ocorreu aumento na porosidade, mas com a melhora da microestrutura, promovendo um produto final sem comprometimento da porosidade global das argamassas (BEUSHAUSEN; GILLMER; ALEXANDER, 2014). Outro estudo de Snoeck e outros (2015) apontou que pastas de cimento com PSA e sem água adicional apresentaram diminuição na quantidade de micro e mesoporos e apresentaram microestrutura semelhante a pastas com a mesma relação entre água

e aglomerante. Sendo assim, o fator que mais influencia na porosidade é a água adicional acrescentada em função da capacidade de absorção dos PSAs.

De maneira geral, apesar da diferença de porosidade notada, não foi possível identificar nenhum outro comprometimento, como fissuras, na microestrutura por conta da adição e possibilidade de expansão dos polímeros superabsorventes. Mesmo assim, estudos mais aprofundados como porosimetria, teor de ar incorporado e absorção de água, índice de vazios e massa específica dos corpos de prova com a utilização PSA em compósitos cimentícios com ACBC devem ser desenvolvidos a fim de aprofundar a análise da microestrutura de argamassas com PSA e ACBC.

5.7.4 Resistência à tração na Flexão (CP III)

A resistência à tração na flexão também foi avaliada para corpos de prova moldados com cimento CP III. A Tabela 35 apresenta as médias dos resultados de resistência à tração na flexão de cada traço nas idades de rompimento pré-estabelecidas, e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 35 - Médias e desvios padrões de resistência à tração na flexão (CP III)

Traço	7 dias	14 dias	28 dias	84 dias	168 dias
	Média - Desvio Padrão (MPa)				
REF III	4,96 ± 0,03	4,73 ± 0,58	6,11 ± 0,15	6,73 ± 0,27	7,50 ± 0,53
ACBC III	4,27 ± 0,23	5,12 ± 0,53	6,37 ± 0,64	6,79 ± 0,16	7,43 ± 0,19
ACBC IIIA	3,58 ± 0,21	3,72 ± 0,25	5,53 ± 0,36	6,40 ± 0,27	7,71 ± 0,35
ACBC IIIB	3,46 ± 0,16	3,15 ± 0,30	5,27 ± 0,58	6,23 ± 0,24	7,68 ± 0,23
ACBC IIIC	3,70 ± 0,17	3,24 ± 0,19	5,13 ± 0,85	6,08 ± 0,11	7,50 ± 0,25

Para facilitar a comparação dos resultados a Figura 66 apresenta os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão dos corpos de prova moldados com cimento CP III por meio de um gráfico.

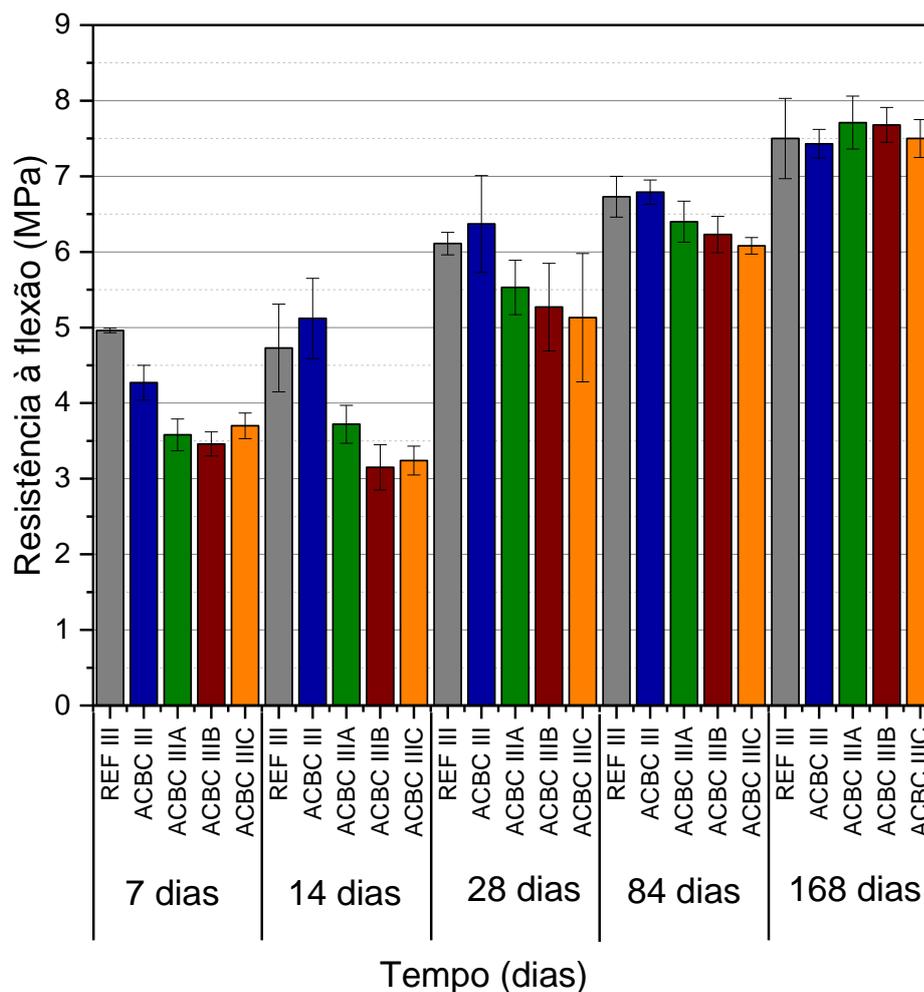


Figura 66 - Resultados de resistência à tração na flexão dos traços com cimento CP III

Ao longo do ensaio, como esperado, houve um aumento na resistência à tração na flexão tendo um ganho significativo entre as idades de 84 e 168 dias por parte dos traços com polímeros superabsorventes. Até 84 dias na maior parte das idades o traço sem polímeros, mas com ACBC foi que obteve resistência à tração na flexão mais expressiva. Além disso, nas primeiras idades os traços com polímeros superabsorventes apresentaram resistências inferiores, muito por conta da maior quantidade de água de amassamento em virtude da necessidade dos polímeros.

Porém, mais uma vez, o ganho de resistência ao longo do ensaio ficou evidente, conforme as reações de hidratação aconteciam, tendo esses compósitos cimentícios alcançado resistências no que diz respeito à tração na flexão, acima dos traços sem PSA. Após 168 dias foi possível observar maior similaridade entre os resultados de cada traço. O traço com PSA-A apresentou aumento de resistência à tração na flexão

de 3,77%, enquanto o PSA-B proporcionou aumento de 3,36% e o PSA-C de 0,94%, em relação ao traço com ACBC e sem PSA. Assim, é possível afirmar que a utilização de polímeros superabsorventes em compósitos cimentícios confeccionados com cimento CP III não afetou negativamente a resistência à tração na flexão.

Assim como foi executado para o cimento CP V ARI, também foi realizada a análise de variância para cada conjunto de médias em cada idade. O mesmo nível de significância foi considerado (α de 5%). Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à tração na flexão - CP III)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	4,88164E-06	38,3612456
14	0,000339594	14,72589116
28	0,092285625	2,701071303
84	0,006526966	6,802631579
168	0,79396094	0,415457507

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

Com base nesses resultados foi possível notar que, estatisticamente, houve diferença significativa entre os traços analisados nas idades de 7, 14 e 84 dias, tendo a maior diferença ocorrido nas duas primeiras idades. Destaca-se que aos 168 dias os traços apresentaram maior semelhança, o que pode ser justificado pela finalização das reações de hidratação e, conseqüentemente, atuação dos polímeros superabsorventes como agentes de cura.

E para identificar quais médias tiveram maior influência sobre esse resultado, foi realizado o Teste de Tukey por pares. Os resultados obtidos por meio dessa análise estão apresentados na Tabela 37.

Tabela 37 - Teste de Tukey para as médias das resistências à flexão (CP III)

Traço/Idade (dias)	7	14	28	84	168
REF III x ACBC III	≠	≈	≈	≈	≈
REF III x ACBC IIIA	≠	≈	≈	≈	≈
REF III x ACBC IIIB	≠	≠	≈	≈	≈
REF III x ACBC IIIC	≠	≠	≈	≠	≈
ACBC III x ACBC IIIA	≠	≠	≈	≈	≈
ACBC III x ACBC IIIB	≠	≠	≈	≈	≈
ACBC III x ACBC IIIC	≠	≠	≈	≠	≈
ACBC IIIA x ACBC IIIB	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC IIIA x ACBC IIIC	≈	≈	≈	≈	≈
ACBC IIIB x ACBC IIIC	≈	≈	≈	≈	≈

Com base no Teste de Tukey foi possível notar a semelhança já apontada pela anova dos traços nas idades de 28 e 168 dias, além da pequena diferença aos 84 dias de ensaio. Aos 84 dias a diferença significativa ocorreu por conta da diferença entre os traços REF III e ACBC IIIC e entre o ACBC III e ACBC IIIC, ou seja, em ambas as situações o traço ACBC IIIC estava presente, muito por conta da maior quantidade de água adicional, já apontada nas análises gráficas. Além disso, também foi possível perceber a semelhança entre os traços contendo polímeros superabsorventes ao longo de todo ensaio, não apresentando diferença significativa em nenhuma idade.

5.7.5 Resistência à Compressão (CP III)

Juntamente ao ensaio de resistência à tração na flexão, a resistência à compressão também foi avaliada para o cimento CP III. A Tabela 38 apresenta as médias dos resultados de resistência à compressão de cada traço nas idades de rompimento pré-estabelecidas, e seus respectivos desvios padrões.

Tabela 38 - Médias e desvios padrões de resistência à compressão (CP III)

Traço	7 dias	14 dias	28 dias	84 dias	168 dias
	Média - Desvio Padrão (MPa)				
REF III	38,44 ± 0,64	39,38 ± 0,32	42,67 ± 0,74	46,25 ± 0,82	51,61 ± 1,11
ACBC III	36,47 ± 0,86	42,72 ± 0,37	45,67 ± 0,92	49,07 ± 1,00	54,18 ± 1,40
ACBC IIIA	32,62 ± 0,33	38,60 ± 0,47	42,15 ± 0,36	45,23 ± 1,04	49,85 ± 1,10
ACBC IIIB	24,62 ± 0,53	29,74 ± 0,24	32,53 ± 0,42	35,00 ± 0,27	38,71 ± 0,90
ACBC IIIC	26,46 ± 0,38	30,79 ± 0,46	34,89 ± 0,32	38,34 ± 0,85	43,52 ± 1,03

A fim de, mais uma vez, facilitar a comparação dos resultados a Figura 67 apresenta os resultados do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova moldados com cimento CP III, por meio de um gráfico.

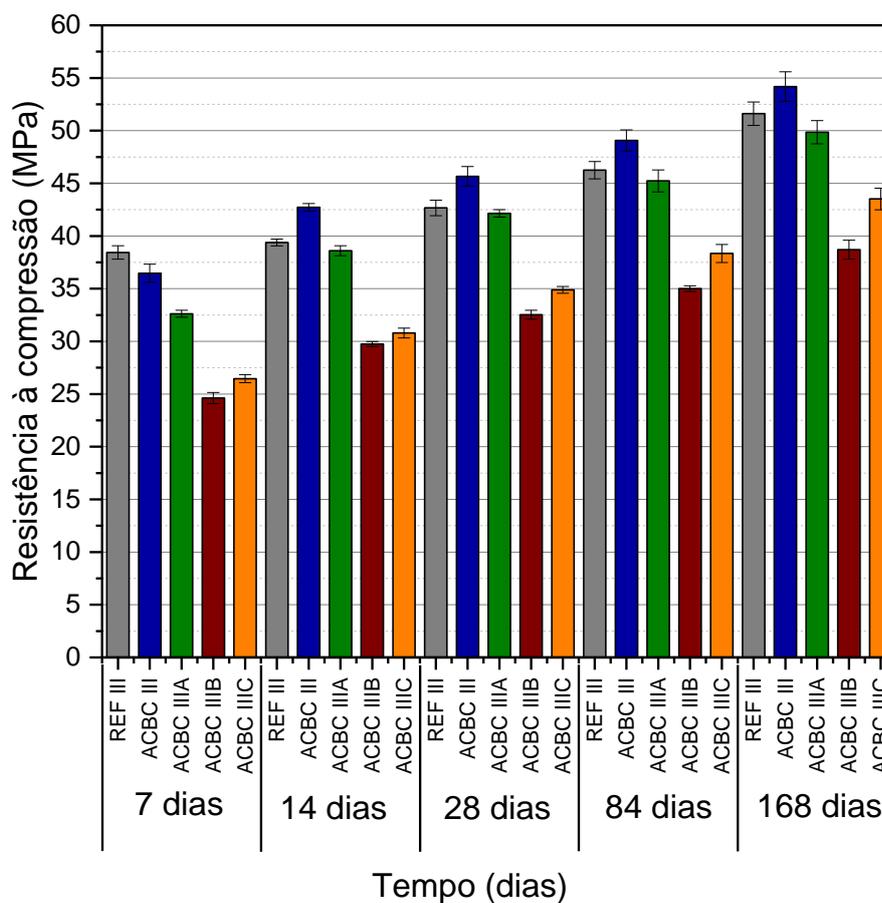


Figura 67 - Resultados de resistência à compressão dos traços com cimento CP III

Com exceção dos 7 dias, ao longo de todo ensaio foi possível notar uma tendência na qual o traço sem polímeros, mas com ACBC apresentou maior resistência, seguido pelo traço referência (REF III), ACBC IIIA, ACBC IIIC e ACBC IIIB, respectivamente. Após 168 dias, no quesito resistência à compressão, os polímeros superabsorventes A, B e C tiveram influência sobre os resultados, uma vez que proporcionaram redução de 7,99%, 28,55% e 19,68% em relação ao traço que apresentou maior resistência (ACBC III). Mais uma vez, destaca-se que essa redução, principalmente levando em conta os polímeros B e C, pode ser atribuída a maior quantidade de água adicional necessária (0,11 e 0,13 em relação ao aglomerante) para que a consistência desses traços atingisse valores próximos aos outros. Essa quantidade de água elevada é absorvida pelos PSAs e liberada conforme as reações de hidratação, e após a dessorção total da mesma, ocorre o colapso dos PSAs, o qual pode formar poros na microestrutura das argamassas, e, conseqüentemente, reduzindo sua resistência à compressão.

Mesmo assim, todos os traços apresentaram resistências aceitáveis, uma vez que atingiram resultados acima de 30 MPa após 28 dias de ensaio. Mais uma vez, destaca-se que a norma NBR 6118 (ABNT, 2014) exige que a resistência característica à compressão alcance no mínimo 20 MPa em ambientes com classe de agressividade I. Com isso, é possível afirmar que os PSAs podem ser utilizados em conjunto com ACBC em traços para fins estruturais e não-estruturais.

Para o ensaio de resistência à compressão com os traços moldados com cimento CP III também foi realizada ANOVA a fim de averiguar se a diferença entre os resultados era significativa estatisticamente. Também foi considerado um nível de significância α de 5%, com os resultados fornecendo 95% de confiança. A Tabela 39 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 39 - Resultados de P-Valor, F e F críticos da ANOVA (Resistência à compressão - CP III)

Idade (dias)	P-Valor	F
7	6,89278E-25	652,8157547
14	1,20626E-28	1310,909776
28	1,1402E-23	520,2087136
84	1,47391E-20	290,3316765
168	2,3567E-18	191,2144544

Nota: O valor de F crítico foi de 3,478.

Com base nesses resultados notou-se grande diferença entre os traços avaliados uma vez que os valores de F foram expressivamente superiores ao F crítico da ANOVA realizada. Inclusive a diferença apresentada foi superior aos traços com CP V ARI. Assim, pode-se afirmar que a adição de polímeros superabsorventes em matrizes cimentícias com cimento CP III desencadeiam maior influência sobre a resistência à compressão das argamassas/concretos. No entanto, também foi possível notar um decréscimo nessa diferença ao longo do ensaio, tendo o valor de F aos 168 uma redução de 70,71% em relação ao valor de F de 7 dias.

E como notou-se diferença significativa entre os traços em todas as idades do ensaio, uma vez que todos os valores de F ficaram acima do F crítico, foi realizado o teste de Tukey por pares para averiguar quais comparações tiveram maior influência sobre esses resultados. A Tabela 40 apresenta o resultado do Teste de Tukey com todas as comparações possíveis.

Tabela 40 - Teste de Tukey para as médias das resistências à compressão (CP III)

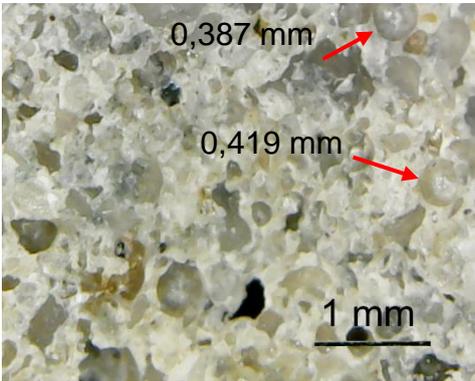
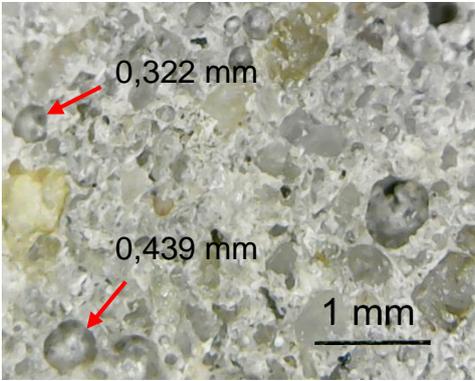
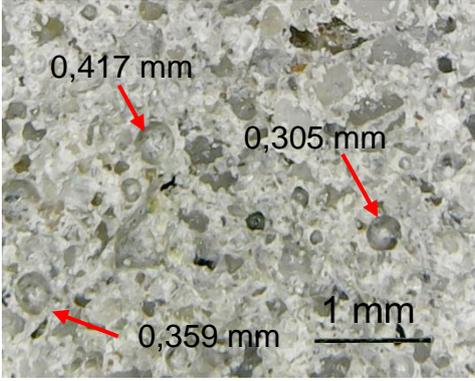
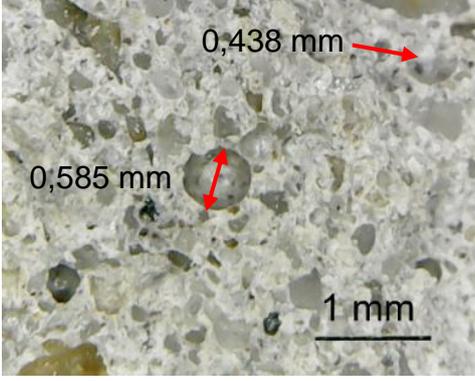
Traço/Idade (dias)	7	14	28	84	168
REF III x ACBC III	≠	≠	≠	≠	≠
REF III x ACBC IIIA	≠	≠	≈	≈	≈
REF III x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≠	≠
REF III x ACBC IIIC	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIA	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC III x ACBC IIIC	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIA x ACBC IIIB	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIA x ACBC IIIC	≠	≠	≠	≠	≠
ACBC IIIB x ACBC IIIC	≠	≠	≠	≠	≠

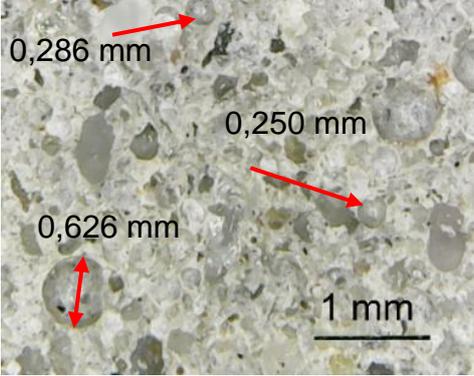
Por meio do Teste Tukey confirmaram-se as diferenças significativas apontadas pela ANOVA. Nesta ocasião, apenas a comparação entre o par REF III e ACBC IIIA não apresentou diferença significativa em todas as idades, apenas aos 7 e 14 dias. Esse resultado provou a influência da adição dos polímeros superabsorventes na resistência das argamassas. Essa diferença está atrelada às diferentes quantidades de água adicional, como mencionado durante a interpretação gráfica dos resultados.

5.7.6 Análise microestrutural (CP III)

Também foi realizada uma análise da microestrutura dos corpos de prova moldados com cimento CP III, após o rompimento aos 168 dias. A Tabela 41 apresenta as imagens realizadas por microscópio óptico, com ampliação de 1000x, tratadas pelo *software ImageJ*.

Tabela 41 - Análise microestrutural por microscopia óptica (1000x) - CP III

Traço	Microscopia aos 168 dias
REF III Fração porosa: 42,03%	
ACBC III Fração porosa: 40,54%	
ACBC IIIA Fração porosa: 43,74%	
ACBC IIIB Fração porosa: 47,63%	

Traço	Microscopia aos 168 dias
ACBC IIIC Fração Porosa: 48,46%	

Comparando os traços REF III e ACBC III, percebeu-se, uma redução na fração porosa, identificada pelo software *ImageJ*, o qual apontou valores de 42,03% e 40,54%, respectivamente. Essa densificação da matriz cimentícia está atribuída pela ACBC que substitui parte dos agregados miúdos da mistura. Outros autores já apontaram essa menor quantidade de poros por parte dos traços com ACBC (MORETTI *et al.*, 2018). Além disso, foram indicadas nas microscopias algumas cavidades deixadas pelo ar e água, as quais auxiliaram na comparação entre os diferentes traços. Avaliando essas cavidades dos traços REF III e ACBC III notou-se uma pequena redução na quantidade de cavidades, mas não no tamanho (0,419 frente a 0,439 mm). Nesse caso, destaca-se a melhor ocupação das partículas de ACBC, auxiliando no tamponamento da maior parte desses espaços. A Figura 68 apresenta uma relação entre a fração porosa obtida e a relação a/c total de cada traço em estudo.

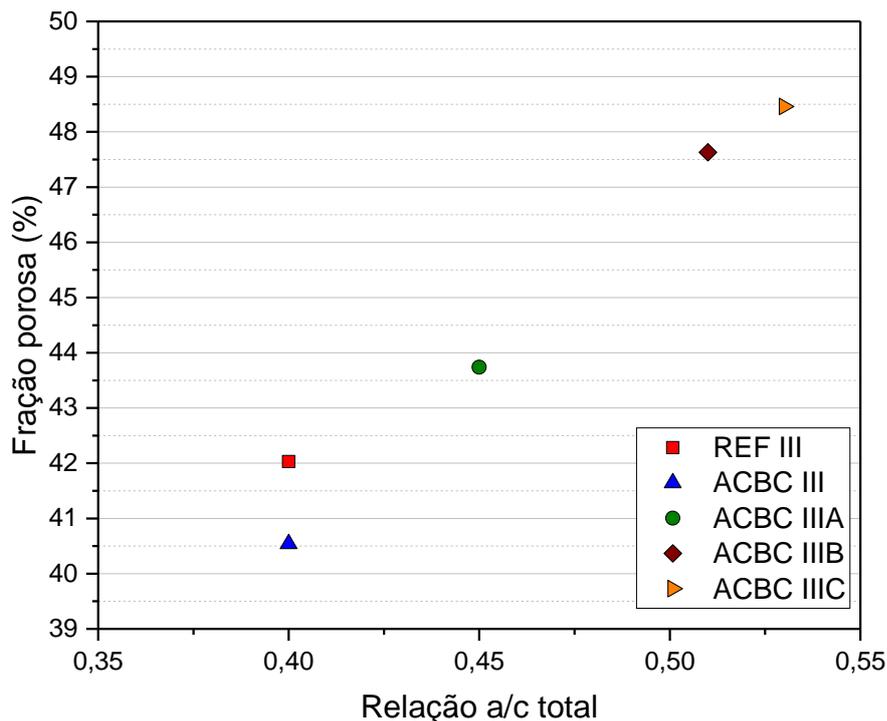


Figura 68 - Relação entre a fração porosa e a proporção a/c total - CP III

Assim como ocorreu com o cimento CP V ARI, foi possível notar um aumento na fração porosa por parte dos traços contendo polímeros superabsorventes (43,74%, 47,63% e 48,46% dos traços ACBC IIIA, B e C, respectivamente), o que justifica a menor resistência à compressão dos mesmos, se comparados ao traço com ACBC e sem polímeros (com fração porosa de 40,54%). Também identificou-se um aumento no tamanho das cavidades apontadas nas imagens, em decorrência da maior quantidade de água adicional utilizada nos traços ACBC IIIB e ACBC IIIC (até 0,585 mm e 0,626 mm) em relação ao ACBC IIIA (até 0,417). No entanto, não houve grande diferença entre o tamanho e quantidade de poros dos traços contendo PSA-B e PSA-C, uma vez que a quantidade de água adicional é de 0,11 e 0,13, respectivamente, tendo apenas 0,02 de diferença. Por conta disso, a fração porosa identificada também não teve diferença expressiva.

Destaca-se também que a fração porosa do traço referência foi superior ao traço ACBC III (42,03 vs 40,54%), como esperado, no entanto, inferior aos traços com ACBC e polímeros. Isso pode estar associado à quantidade de água adicional e aos possíveis espaços deixados pelos PSAs após a liberação total da água e colapso.

Esse colapso deixa pequenos espaços que são parcial, ou totalmente preenchidos com produtos da hidratação do cimento, os quais aumentam a porosidade das argamassas (MECHTCHERINE *et al.*, 2021; ROSTAMI; KLEMM; ALMEIDA, 2021; WYRZYKOWSKI *et al.*, 2018).

Por fim, não foram observadas imperfeições, como fissuras, ocasionadas por possíveis efeitos expansivos promovidos pelos PSA e, portanto, esse material pode ser um aliado na minimização de fissuras provenientes da retração autógena. No entanto, é importante sempre avaliar as exigências mecânicas para o fim que as argamassas contendo PSAs serão utilizadas, uma vez que houve influência dos PSAs na resistência à compressão das argamassas.

6. Conclusão

Por meio deste estudo foi possível avaliar a cura interna de compósitos cimentícios ecoeficientes com incorporação de areia de cinza do bagaço de cana-de-açúcar (ACBC) por meio de polímeros superabsorventes (PSA). O programa experimental proposto permitiu elencar as seguintes conclusões:

Durante os ensaios de retração plástica, os traços contendo ACBC sem polímeros proporcionaram fissuras mais evidentes em relação ao traço de referência (sem fissuras identificadas). Esse efeito foi decorrente da matriz cimentícia mais densa proporcionada pela maior quantidade de finos da ACBC em relação aos agregados naturais. No entanto, para ambos os cimentos avaliados (CP V ARI e CP III) os PSAs adicionados reduziram essa espessura média das fissuras em até 81,92% e 39,88%, respectivamente, quando comparados ao traço com ACBC e sem PSA. O melhor resultado foi proporcionado pelo PSA com capacidade de absorção intermediária.

Os traços com ACBC e sem PSA apresentaram redução na retração autógena em 18,10% (CP V ARI) e 18,48% (CP III), evidenciando que agregados alternativos provenientes de resíduos industriais. Durante esses ensaios, os PSAs reduziram a retração autógena em até 28,24% na presença do cimento CP V ARI e 119,19% com cimento CP III. O melhor resultado foi proveniente do traço com o PSA com a maior capacidade de absorção e, conseqüentemente, maior quantidade de água adicional ao traço (0,13). Esses resultados comprovaram a eficiência dos PSAs em atuar como agentes de cura, sobretudo, em traços com o cimento CP III, na qual, quanto maior a quantidade de água disponível para atuação do PSA (sem ultrapassar a consistência pré-estabelecida) maior a redução da retração autógena. Para ambos os tipos de cimento, o sistema de revestimento por meio de parafina foi eficiente, uma vez que, durante os ensaios de retração autógena, os corpos de prova apresentaram perda de água de amassamento inferior a 0,3%.

A ação dos PSAs no ensaio de retração por secagem foi prejudicada, muito por conta da exposição dos corpos de prova ao ambiente, fazendo com que as misturas

perdessem água de maneira precoce. Nesse quesito, a maior redução na retração (24,78%) foi observada quando utilizado o PSA com menor capacidade de absorção. Diferente do ensaio de retração autógena, esses resultados mostraram que quanto menor a quantidade de água adicional, maior a redução da retração por secagem.

De maneira geral, com base nos resultados de retração observados, concluiu-se que a utilização de PSAs não afeta os efeitos da ACBC nos compósitos cimentícios, promovendo, até mesmo, benefícios, visto que essa combinação reduziu a espessura média das fissuras na retração plástica, reduziu a retração autógena e não prejudicou os corpos de prova durante o ensaio de retração por secagem. Assim, pode-se concluir que a ACBC e os PSAs são compatíveis e eficientes na redução da retração, sobretudo autógena das argamassas.

Com relação às propriedades físico-mecânicas de compósitos cimentícios moldados com ACBC e PSAs, não houve influência significativa dos PSAs nos resultados de resistência à tração na flexão. No entanto, a presença dos PSAs fez com que houvesse um aumento da fração porosa das matrizes cimentícias, uma vez que, os traços com esses materiais necessitavam de água adicional para manutenção da consistência pré-estabelecida no programa experimental do estudo. Esse aumento de porosidade refletiu nos resultados de resistência à compressão, reduzindo na proporção de 19% na presença do cimento CP V ARI e 28,55% com cimento CP III. Os PSAs com maior influência sobre os resultados de resistência à compressão foram os que possuíam maior capacidade de absorção intermediária e, conseqüentemente, maior quantidade de água na mistura. Contudo, mesmo com essa redução, os traços alcançaram resistências acima de 35 MPa, justificando a possibilidade de aplicação de PSA em traços com ACBC, quando necessário, para a redução da suscetibilidade de fissuração em decorrência das retrações plástica e autógena.

Logo, a aplicação de PSAs em conjunto com a ACBC é promissora, principalmente como solução ecoeficiente, para auxiliar na mitigação de problemas associados à exploração excessiva de recursos naturais, conferindo produtos mais duráveis no que diz respeito à suscetibilidade de fissuração proveniente, sobretudo, das retrações plástica e autógena.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Uma das sugestões para trabalhos futuros é avaliar a durabilidade de argamassas/concretos contendo ACBC combinada com PSAs, no que diz respeito ao ingresso de agentes agressivos, como a carbonatação e a penetração de cloretos. Além disso, analisar o potencial de corrosão de armaduras embutidas em corpos de prova confeccionados com esses materiais, pela técnica de potencial em circuito aberto, em conjunto com técnicas quantitativas, a fim de averiguar se os produtos da utilização desses materiais promovem matrizes resistentes a esse fenômeno.

Outra sugestão seria investigar a utilização de PSAs em outras proporções adicionados a matrizes contendo ACBC com o intuito de analisar uma possível competição com relação a absorção da água de mistura presente nas argamassas e concretos, para obtenção de um teor ótimo de água adicional. Como a ACBC atuou, mesmo que em menor proporção, como um agente de cura, é possível que possam ser utilizadas proporções inferiores de PSA para obtenção de resultados mais expressivos relacionados à redução da retrações plástica, autógena e por secagem.

A presente pesquisa também mostrou a necessidade de realizar a avaliação microestrutural em diferentes idades no ensaio de resistência à compressão. Junto à essa avaliação microestrutural, também vale destacar a necessidade do aprofundamento do conhecimento no que diz respeito à porosidade desses traços, com ensaios como porosimetria, absorção de água, índice de vazios, massa específica, densidade de massa, teor de ar incorporado e desempenho ante o congelamento e descongelamento, podendo ser parte de um estudo futuro.

Por fim, outro estudo poderia avaliar diferentes relações entre água e aglomerante, ou até mesmo utilizar essa relação fixa, sem água adicional, variando o espalhamento de cada um dos traços, a fim de verificar e apontar a influência dessa ação nas propriedades mecânicas dessas misturas. Além disso, também destaca-se a possibilidade de avaliar a retração nas idades iniciais, com menor espaçamento entre as medições, para aprofundar o conhecimento relacionado ao comportamento desses traços diante da retração autógena no início das reações de hidratação (entre o tempo final de pega e as primeiras 24 horas de ensaio).

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F. C. R. et al. Sugarcane bagasse ash sand (SBAS): Brazilian agroindustrial by-product for use in mortar. **Construction and Building Materials**, v. 82, p. 31–38, 2015.

ALMEIDA, F. C. R. et al. Use of sugarcane bagasse ash sand (SBAS) as corrosion retardant for reinforced Portland slag cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 226, p. 72–82, 2019.

ALMEIDA, F. C. R.; KLEMM, A. J. Efficiency of internal curing by superabsorbent polymers (SAP) in PC-GGBS mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 88, p. 41–51, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 1579-13: Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)**, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar**, 2019.

ARIF, E.; CLARK, M. W.; LAKE, N. Sugar cane bagasse ash from a high-efficiency co-generation boiler as filler in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 692–703, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15261: 2005 Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)**. Rio de Janeiro, 2005a.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de**

estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16607 : Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17053: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, 2022.

BEUSHAUSEN, H.; GILLMER, M.; ALEXANDER, M. The influence of superabsorbent polymers on strength and durability properties of blended cement mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 52, p. 73–80, 2014.

BOSHOF, W. et al. The effect of superabsorbent polymers on the mitigation of plastic

shrinkage cracking of conventional concrete, results of an inter-laboratory test by RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 53, n. 4, 2020.

BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS EN 197-1 - Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements**, 2011.

CHINDASIRIPHAN, P.; YOKOTA, H.; PIMPAKAN, P. Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability. **Construction and Building Materials**, v. 233, p. 116975, 2020.

CHUSILP, N.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. Utilization of bagasse ash as a pozzolanic material in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 11, p. 3352–3358, 2009.

CORDEIRO, G. C. et al. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 2, p. 110–115, 2009.

CRAEYE, B.; GEIRNAERT, M.; SCHUTTER, G. DE. Super absorbing polymers as an internal curing agent for mitigation of early-age cracking of high-performance concrete bridge decks. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 1–13, 2011.

DE MEYST, L. et al. The influence of superabsorbent polymers (SAPs) on autogenous shrinkage in cement paste, mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 286, p. 122948, 2021.

DE SOARES, M. M. N. S. et al. Comparing the pozzolanic behavior of sugar cane bagasse ash to amorphous and crystalline SiO₂. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 20–25, 2016.

EMBRAPA. **Trajatória/Desempenho Recente do Agro Nacional: A Cana de Açúcar**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/trajetoria-do-agro/desempenho-recente-do-agro/cana-de-acucar>>.

ESTEVEES, L. P. Superabsorbent polymers: On their interaction with water and pore

fluid. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 7, p. 717–724, 2011.

ESTEVEZ, L. P.; JENSEN, O. M. Absorbency of Superabsorbent Polymers in Cementitious Environments. **Materials Research Society**, v. 1448, p. 25–31, 2012.

FAO. **World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2020**. [s.l: s.n.].

FRANCO DE CARVALHO, J. M. et al. Enhancing the eco-efficiency of concrete using engineered recycled mineral admixtures and recycled aggregates. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, 2020.

GHOURECHIAN, S. et al. Susceptibility of Portland cement and blended cement concretes to plastic shrinkage cracking. **Cement and Concrete Composites**, v. 85, p. 44–55, 2018.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION (GCCA). **Global Cement And Concrete Industry Announces Roadmap To Achieve Groundbreaking ‘Net Zero’ CO₂ Emissions By 2050**.

GONÇALVES, H. et al. The influence of porogene additives on the properties of mortars used to control the ambient moisture. **Energy and Buildings**, v. 74, p. 61–68, 2014.

GUO, X. et al. Durability and microstructure of CSA cement-based materials from MSWI fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 26–31, 2014.

HASHOLT, M. T. et al. Can superabsorbent polymers mitigate autogenous shrinkage of internally cured concrete without compromising the strength? **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 226–230, 2012.

HEMKEMEIER, T. A. et al. Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes. **Case Studies in Construction Materials**, n. April 2022, p. 12, 2022.

HEMKEMEIER, T. A. et al. Repair mortars with water treatment plant sludge (WTPS) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) for more eco-efficient and durable

constructions. **Journal of Cleaner Production**, v. 386, n. December 2022, p. 135750, 2023.

HONG, G.; CHOI, S. Rapid self-sealing of cracks in cementitious materials incorporating superabsorbent polymers. **Construction and Building Materials**, v. 143, p. 366–375, 2017.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 4, p. 647–654, 2001.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: II. Experimental observations. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 6, p. 973–978, 2002.

JUSTS, J. et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 82–90, 2015.

KANG, S. H.; HONG, S. G.; MOON, J. Absorption kinetics of superabsorbent polymers (SAP) in various cement-based solutions. **Cement and Concrete Research**, v. 97, p. 73–83, 2017.

KIRTHIKA, S. K.; SINGH, S. K.; CHOURASIA, A. Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 268, p. 122089, 2020.

KLEMM, A. J.; ALMEIDA, F. C. R.; SIKORA, K. S. Application of superabsorbent polymers (SAP) in cementitious materials with blended cements. **Concrete Plant International Journal**, n. 4, p. 50–58, 2016.

LAUSTSEN, S.; HASHOLT, M. T.; JENSEN, O. M. Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 48, n. 1–2, p. 357–368, 2015.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete. **Advances in Applied Ceramics**, v. 109, n. 5, p.

296–302, 2010.

LEEMANN, A.; NYGAARD, P.; LURA, P. Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 46, p. 1–7, 2014.

LOTTHENBACH, B. Thermodynamic equilibrium calculations in cementitious systems. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 43, n. 10, p. 1413–1433, 2010.

MECHTCHERINE, V. et al. Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: Results of a RILEM round-robin test. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 47, n. 3, p. 541–562, 2014.

MECHTCHERINE, V. et al. Effect of superabsorbent polymers (SAP) on the freeze–thaw resistance of concrete: results of a RILEM interlaboratory study. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 1, 2017.

MECHTCHERINE, V. et al. Testing superabsorbent polymer (SAP) sorption properties prior to implementation in concrete: results of a RILEM Round-Robin Test. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 1, 2018.

MECHTCHERINE, V. et al. Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction—update of RILEM state-of-the-art report. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 54, n. 2, 2021.

MECHTCHERINE, V.; REINHARDT, H. W. Application of superabsorbent polymers (SAP) in concrete construction: State of the art report prepared by technical committee 225-SAP. **Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP**, p. 1–164, 2012.

MECHTCHERINE, V.; SECRIERU, E.; SCHRÖFL, C. Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars -

Development of yield stress and plastic viscosity over time. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 52–65, 2015.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

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, 2008.

MIGNON, A. et al. Development of amine-based pH-responsive superabsorbent polymers for mortar applications. **Construction and Building Materials**, v. 132, p. 556–564, 2017.

MORETTI, J. P. et al. Joint use of construction waste (CW) and sugarcane bagasse ash sand (SBAS) in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 317–323, 2016.

MORETTI, J. P. et al. Pore size distribution of mortars produced with agroindustrial waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 473–484, 2018.

NETO, A. A. M.; CINCOTTO, M. A.; REPETTE, W. Mechanical properties, drying and autogenous shrinkage of blast furnace slag activated with hydrated lime and gypsum. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 4, p. 312–318, 2010.

PEDUZZI, P. Sand, rarer than one thinks. Article reproduced from United Nations Environment Programme (UNEP) Global Environmental Alert Service (GEAS). **Environmental Development**, v. 11, p. 208–218, 2014.

POURJAVADI, A. et al. Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 196–204, 2013.

RAJABIPOUR, F.; SANT, G.; WEISS, J. Interactions between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 5, p. 606–615, 2008.

ROSTAMI, R.; KLEMM, A. J.; ALMEIDA, F. C. R. Reduction of shrinkage by Superabsorbent polymers (SAP) in fibre reinforced mortars. **Construction and Building Materials**, v. 288, p. 123109, 2021.

SADIQUL ISLAM, G. M.; GUPTA, S. DAS. Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 5, n. 2, p. 345–354, 2016.

SALES, A.; LIMA, S. A. Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement. **Waste Management**, v. 30, n. 6, p. 1114–1122, 2010.

SANT, G. et al. The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 3, p. 218–229, 2011.

SCHROEFL, C. et al. Sorption kinetics of superabsorbent polymers (SAPs) in fresh Portland cement-based pastes visualized and quantified by neutron radiography and correlated to the progress of cement hydration. **Cement and Concrete Research**, v. 75, p. 1–13, 2015.

SCHRÖFL, C. et al. Recent progress in superabsorbent polymers for concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 151, n. October 2021, 2022.

SCHRÖFL, C.; MECHTCHERINE, V.; GORGES, M. Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 865–873, 2012.

SCHRÖFL, C.; SNOECK, D.; MECHTCHERINE, V. A review of characterisation methods for superabsorbent polymer (SAP) samples to be used in cement-based construction materials: report of the RILEM TC 260-RSC. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 50, n. 4, 2017.

SENF, L. et al. Development of mortars containing superabsorbent polymer. **Construction and Building Materials**, v. 95, p. 575–584, 2015.

SHEN, D. et al. Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age. **Construction and Building Materials**, v. 106, n. 1, p. 512–522, 2016.

SIDIQ, A. et al. The effectiveness of Super Absorbent polymers and superplasticizer in self-healing of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 253, p. 119175, 2020.

SIRAJUDDIN, M.; GETTU, R. Plastic shrinkage cracking of concrete incorporating mineral admixtures and its mitigation. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 2, 2018.

SNOECK, D. et al. Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 148–157, 2014.

SNOECK, D. et al. The effects of superabsorbent polymers on the microstructure of cementitious materials studied by means of sorption experiments. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 26–35, 2015.

SNOECK, D.; JENSEN, O. M.; DE BELIE, N. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 74, p. 59–67, 2015.

SONG, C.; CHOI, Y. C.; CHOI, S. Effect of internal curing by superabsorbent polymers – Internal relative humidity and autogenous shrinkage of alkali-activated slag mortars. **Construction and Building Materials**, v. 123, p. 198–206, 2016.

TORRES DE SANDE, V. et al. Potential use of sugar cane bagasse ash as sand replacement for durable concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 39, n. February, p. 102277, 2021.

VENKATACHALAM, D.; KALIAPPA, S. Superabsorbent polymers: A state-of-art review on their classification, synthesis, physicochemical properties, and applications.

Reviews in Chemical Engineering, v. 39, n. 1, p. 127–171, 2023.

VOLLPRACHT, A. et al. The pore solution of blended cements: a review. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 49, n. 8, p. 3341–3367, 2016.

WANG, F. et al. Influence of superabsorbent polymers on the surrounding cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 81, p. 112–121, 2016.

WYRZYKOWSKI, M. et al. Recommendation of RILEM TC 260-RSC: using superabsorbent polymers (SAP) to mitigate autogenous shrinkage. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 51, n. 5, p. 1–7, 2018.

WYRZYKOWSKI, M.; LURA, P. Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement. **Cement and Concrete Research**, v. 85, p. 75–81, 2016.

YAO, Y.; ZHU, Y.; YANG, Y. Incorporation superabsorbent polymer (SAP) particles as controlling pre-existing flaws to improve the performance of engineered cementitious composites (ECC). **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 139–145, 2012.

ZHENG, X.; HAN, M.; LIU, L. Effect of superabsorbent polymer on the mechanical performance and microstructure of concrete. **Materials**, v. 14, n. 12, 2021.

ZHUTOVSKY, S.; KOVLER, K. Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 144, p. 311–316, 2017.

ZOHURIAAN-MEHR, M. J. et al. Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. **Journal of Materials Science**, v. 45, n. 21, p. 5711–5735, 2010.

Anexo A

As Figuras 69 e 70 apresentam os gráficos provenientes da caracterização química dos dois tipos de cimento, CP V ARI e CP III, respectivamente, realizada por FRX.

Figura 69 - Gráficos provenientes da análise FRX do cimento CP V ARI

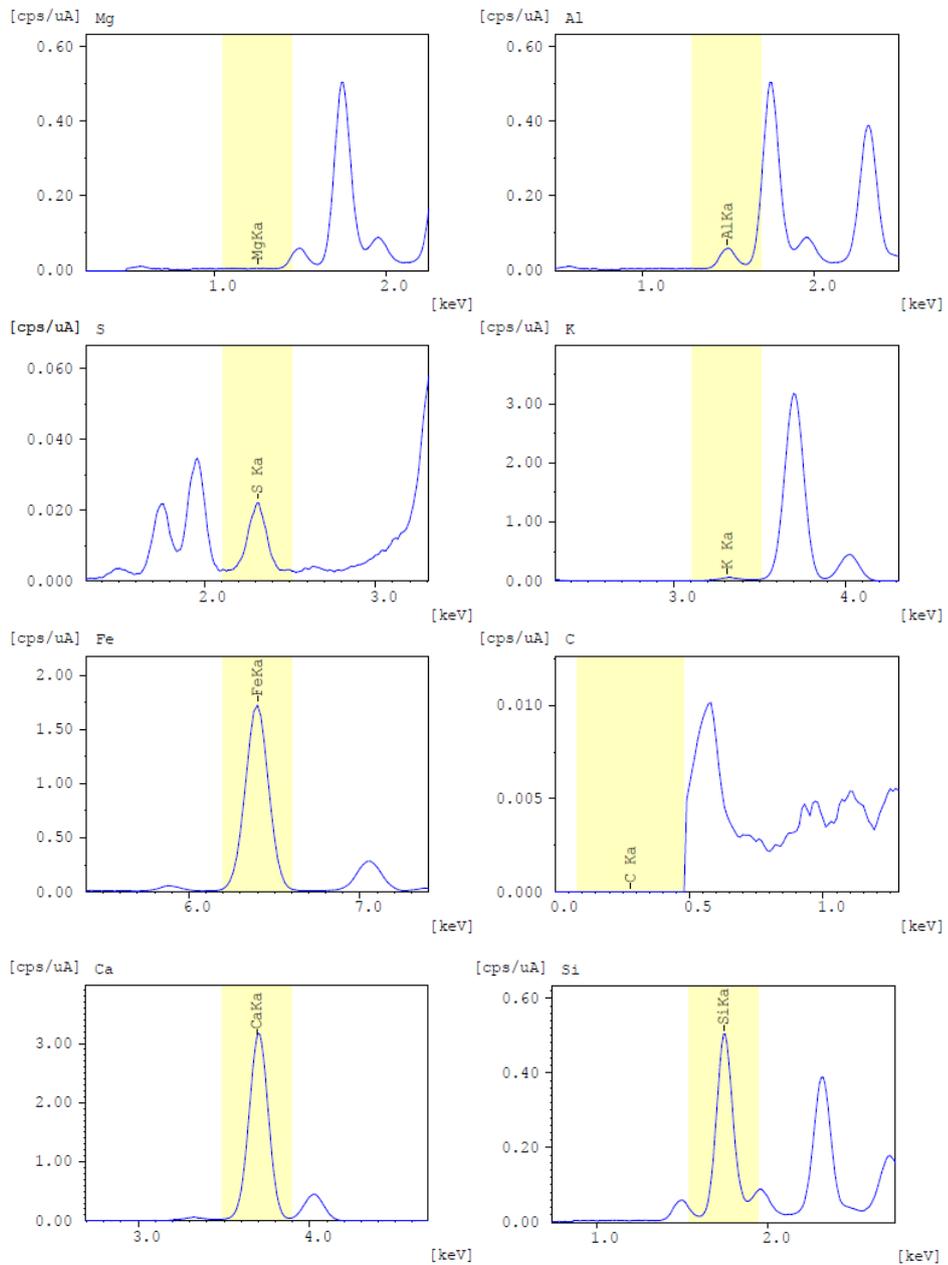


Figura 70 - Gráficos provenientes da análise FRX do cimento CP III

