

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA,
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

Poliana Naissinger Hartmann

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE
FIBRAS SINTÉTICAS E DE AGENTE DE CURA INTERNA (SAP) EM
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE**

**Alegrete - RS
2022**

Poliana Naissinger Hartmann

**CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA: INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE
FIBRAS SINTÉTICAS E DE AGENTE DE CURA INTERNA (SAP) EM
PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE DURABILIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia - PPeng da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Profa. Dra. Fernanda Bianchi
Pereira da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Ederli Marangon

Alegrete - RS
2022

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

H333c Hartmann, Poliana Naissinger
Concreto de alta resistência: Influência da incorporação de
fibras sintéticas e de agente de cura interna (SAP) em
propriedades mecânicas e de durabilidade / Poliana Naissinger
Hartmann.
174 p.

Dissertação(Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
MESTRADO EM ENGENHARIA, 2022.
"Orientação: Fernanda Bianchi Pereira da Costa".

1. polímero superabsorvente. 2. retração. 3. macrofibra
Barchip. 4. porosidade. I. Título.

POLIANA NAISSINGER HARTMANN

Concreto de alta resistência: influência da incorporação de fibras sintéticas e agente de cura interna (SAP) em propriedades mecânicas e de durabilidade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre Engenharia.

Dissertação defendida e aprovada em: 27 de outubro de 2022

Banca examinadora:

Profa. Dra. Fernanda Bianchi Pereira da Costa
Orientador
(Unipampa)

Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
(UFRGS)

Prof. Dr. André Lübeck

Prof. Dr. Ederli Marangon

Co-orientador

(Unipampa)



Assinado eletronicamente por **FERNANDA BIANCHI PEREIRA DA COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/12/2022, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EDERLI MARANGON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/12/2022, às 17:56, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1019055** e o código CRC **A77DB72F**.

*Este trabalho é dedicado à todos que não desistem de sonhar
e que buscam, com muito esforço e dedicação, realizar os seus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por esta conquista e por ter me dado força e coragem para enfrentar os obstáculos que encontrei pelo caminho.

Aos meus queridos e amados pais Lauri e Maria Eli, agradeço por me amarem imensamente e por confiarem no meu potencial, principalmente quando eu mesma duvidava dele. Mesmo como toda sua humildade, vocês sabiam que este era o caminho certo e nunca me deixaram desaminar ou se quer pensar em desistir. Obrigada pai e mãe, por me darem asas para voar e, principalmente, por me lembrarem que sempre haverá um lar para retornar. Todas as minhas conquistas eu decido à vocês.

Aos demais familiares, em especial meu irmão Paulo e meu sobrinho Erick, pelo incentivo, apoio, carinho, paciência e pelos momentos felizes compartilhados, os quais me deram forças para continuar.

Ao meu namorado e melhor amigo Gabriel, agradeço imensamente pelo amor e companheirismo compartilhados. Obrigada por ouvir minhas lamentações e inquietações e sempre me fazer ver o lado bom das situações. Agradeço também, por seu maior incentivador e por ajudar todas as vezes em que precisei. Os momentos felizes que vivenciei contigo me impulsionaram a concluir mais esta etapa da minha vida.

A minha orientadora e amiga Prof^ª. Fernanda Pereira da Costa, agradeço por ter embarcado comigo, nesta loucura que foi a minha pesquisa de mestrado. Agradeço por guiar meu caminho até aqui e por ter me dado suporte e apoio nos momentos em que precisei. A convivência contigo me fez crescer como pessoa e, principalmente, como pesquisadora e sua ajuda, certamente, foi essencial para realização desta dissertação.

Agradeço, também, ao meu coorientador Prof. Ederli Marangon, por se fazer presente e por sempre compartilhar seu conhecimento. Sua contribuição, sem dúvidas, melhorou a qualidade deste trabalho.

Aos professores Jaelson Budny, Alisson Milani, Maurício dos Santos e Luis Kostaski agradeço por sempre me socorrer nos momentos de necessidade e por me aconselhar nas difíceis decisões da vida profissional. Vocês certamente são mais que professores, são verdadeiros amigos e exemplos de professores que sempre levarei comigo.

Agradeço imensamente aos colegas de graduação e agora, também de pós graduação, Cibeli Scherer e Fabiano Oliveira, por todo o convívio que tivemos, pelas experiências compartilhadas, pelo apoio recebido e principalmente pelos momentos felizes que vivenciamos. Sentirei saudades de fofocar com vocês.

Agradeço também, aos amigos do LEMAC, Marcelo e Raquel, que auxiliaram durante os ensaios experimentais. Agradeço pelo bom humor, pelas conversas, pelos momentos de descontração e pela amizade que construímos. De maneira semelhante, agradeço ao colega Enrique que me auxiliou durante a realização da pesquisa e que hoje se tornou um amigo.

Agradeço a Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao professor André Lübek, que gentilmente disponibilizou formas para o ensaio de retração e realizou o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico junto ao LMCC.

Aos demais amigos e colegas do PPENG que tive o prazer de conviver e trocar experiências durante o mestrado, eu os agradeço de coração.

A CAPES pela bolsa de estudos que possibilitou a minha dedicação total a esta pesquisa.

*"The future belongs to those
who believe in the beauty
of their dreams."
(Eleanor Roosevelt)*

RESUMO

O concreto de alta resistência (CAR) se difundiu na construção civil devido a necessidade de maior resistência e durabilidade das estruturas. Contudo, seu elevado desempenho mecânico é associado também, a baixa relação a/c, ao elevado consumo de cimento e as adições minerais altamente reativas, que densificam a microestrutura e refinam os poros, reduzindo a permeabilidade. Tais fatores corroboram para elevadas taxas de autodessecação, que provocam a retração autógena. A fissuração precoce, desencadeada pelo fenômeno da retração, é um fator limitante para a utilização do CAR, pois afeta diretamente o seu desempenho e durabilidade. Este fenômeno tem sido consideravelmente atenuado pela cura interna com polímero superabsorvente (SAP), no entanto, seu desempenho frente às propriedades mecânicas ainda geram controvérsias no meio científico. De modo semelhante, as fibras sintéticas, têm sido muito utilizadas para controlar o processo de retração, porém recentemente surgiram as macrofibras sintéticas com alto desempenho que podem contribuir também, para melhorar o desempenho mecânico. Este trabalho visa, portanto, avaliar o efeito da incorporação de macrofibras sintéticas e de agente de cura interna (SAP) frente as propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase na retração. Assim, foram incorporados ao concreto, a macrofibra Barchip (0,5% em volume) e o agente de cura interna (0,32% em relação a massa de cimento), totalizando quatro traços, com e sem fibra, ambos com e sem SAP. Os traços foram comparados através de ensaios relacionados ao estudo da estrutura de poros (absorção e índice de vazios e absorção de água por capilaridade), liberação de calor de hidratação, retração livre, compressão uniaxial, tração na flexão e, por fim, módulo de elasticidade estático e dinâmico. Os resultados indicam que a adição do SAP como agente de cura, contribui de forma significativa para melhorar a hidratação do cimento e reduzir as taxas de retração autógena e retração total. Sua desvantagem está relacionada ao aumento na porosidade, que tende a reduzir as propriedades mecânicas, principalmente a resistência à compressão. A fibra, por sua vez, apesar de não elevar significativamente o desempenho mecânico da matriz, elevou a ductibilidade, fornecendo resistência residual. Ainda, reduziu a interconectividade entre os poros, mitigou significativamente a retração por secagem, chegando a superar o SAP na retração total. A combinação dos materiais, por sua vez, não se mostrou eficiente para as propriedades estudadas. Desta forma, conclui-se que adição do SAP e da fibra Barchip de maneira isolada, pode melhorar o desempenho CAR na retração.

Palavras-chave: polímero superabsorvente, retração, macrofibra Barchip, porosidade

ABSTRACT

High-strength concrete (HSC) has become widespread in civil construction due to the need for greater strength and durability of structures. However, its high mechanical performance is also associated with the low w/c ratio, the high consumption of cement and the highly reactive mineral additions, which densify the microstructure and refine the pores, reducing permeability. These factors provide high rates of self-drying, which cause autogenous shrinkage. Early cracking, triggered by the phenomenon of autogenous shrinkage and drying shrinkage, is a limiting factor for the use of HSC, as it directly affects its performance and durability. Early cracking, triggered by the phenomenon of autogenous shrinkage and drying shrinkage, is a limiting factor for the use of HSC, as it directly affects its performance and durability. This phenomenon has been considerably attenuated by internal curing with superabsorbent polymer (SAP), however, its performance in terms of mechanical properties still generates controversy in the scientific environment. Thus, the Barchip macrofiber (0.5% in volume) and the internal curing agent (0.32% in relation to the cement mass) were incorporated into the concrete, totaling four mixtures, with and without fiber, both with and without SAP. The mixtures were compared through tests related to the study of pore structure (absorption and void index and water absorption by capillarity), heat release of hydration, free shrinkage, uniaxial compression, flexural tension and, finally, modulus of static and dynamic elasticity. The results indicate that the addition of SAP as a curing agent significantly contributes to improve cement hydration and reduce the rates of autogenous shrinkage and drying shrinkage. Its disadvantage is related to the increase in porosity, which tends to reduce the mechanical properties, especially the compressive strength. The fiber, in turn, although it does not significantly alter the performance of the matrix, it increased the ductility of the matrix, reinforcing the residual strength. Still, between attraction for the interconnectivity, significantly mitigating the retraction of SAP, reaching to overcome the total retraction. That of materials, in turn, was not efficient for properties as properties. In this way, it is concluded that adding SAP and Barchip fiber in isolation can improve the performance of CAR in terms of shrinkage.

Keywords: superabsorbent polymer, shrinkage, Barchip macrofiber, porosity

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comportamento de fibras com diferentes módulos de elasticidade	27
Figura 2 – Classificação fibras de polipropileno	31
Figura 3 – Representação dos estágios de hidratação do cimento ao longo do tempo	35
Figura 4 – Evolução da liberação de calor de hidratação para uma pasta de cimento	36
Figura 5 – Esquema representativo sobre a teoria da percolação	37
Figura 6 – Organograma com a classificação das deformações volumétricas em compósitos cimentícios	40
Figura 7 – Medidas de retração autógena em argamassas com diferentes relações a/c	42
Figura 8 – Classificação da água em relação a sua dificuldade de movimentação dentro do compósito	43
Figura 9 – Conceito simplificado da autodessecação, como consequência do avanço da hidratação	46
Figura 10 – Pressão de disjunção quando da perda de água entre os cristais de C-S-H	46
Figura 11 – Tensões hidrostáticas desenvolvidas em meniscos capilares do concreto	47
Figura 12 – Conceito simplificado de cura externa e interna	49
Figura 13 – Fibras atuando na transferência de tensões	50
Figura 14 – Processo de absorção e dessorção do SAP	54
Figura 15 – Determinação da capacidade de absorção de água por cilindros graduados. 1: a relação entre volume e massa das partículas de SAP seco é medida. 2a: uma certa quantidade pequena de SAP seco é colocada em um cilindro graduado. 2b: o cilindro graduado preenchido com o fluido de interesse	59
Figura 16 – Determinação de espalhamento da argamassa de referência e da argamassa com polímero	62
Figura 17 – Distribuição volumétrica da fase de pastas de cimento em função do grau de hidratação para relações a/c de 0,36 (esquerda) e 0,42 (direita)	63
Figura 18 – Programa experimental	70
Figura 19 – Aspecto visual do agregado graúdo	72
Figura 20 – Granulometria da brita	72
Figura 21 – Aparência visual da areia	73
Figura 22 – Granulometria da areia	74
Figura 23 – Aspecto visual da macrofibra Barchip	75
Figura 24 – Geometria e aspecto da fibra Barchip	75

Figura 25 – Comparação visual do aspecto do polímero seco (esquerda) e saturado (direita)	76
Figura 26 – Procedimento de ensaio <i>teabag</i>	78
Figura 27 – Procedimento de ensaio do cilindros graduado	79
Figura 28 – Análise comprativa no formato de um grão de polímero na condição seca (esquerda) e na condição saturada(direita)	80
Figura 29 – Espalhamento de argamassas	81
Figura 30 – Densidade do polímero superabsorvente	82
Figura 31 – Granulometria do polímero superabsorvente	83
Figura 32 – Análise da geometria do SAP através do MEV	84
Figura 33 – Configuração do ensaio da curva de liberação de calor	88
Figura 34 – Execução do ensaio de retração livre, calibração do equipamento (esquerda) e medição da variação dimensional (direita)	89
Figura 35 – Armazenamento dos corpos de prova sobre roletes	90
Figura 36 – Metodologia adotada para realizar a cura selada dos corpos de prova destinados ao ensaio de retração livre	90
Figura 37 – Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade	92
Figura 38 – Execução do ensaio de compressão diametral para determinação da altura de penetração de água	93
Figura 39 – Prensa hidráulica utilizada para realizar o ensaio de compressão simples	94
Figura 40 – Ensaio de compressão simples aplicado até a ruptura do espécime	94
Figura 41 – Prensa hidráulica utilizada para realizar o ensaio de tração na flexão	95
Figura 42 – Aparatos para realização do ensaio do módulo de elasticidade estático	96
Figura 43 – Aparatos do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por impacto	97
Figura 44 – Curvas de liberação de calor de hidratação para os diferentes traços pesquisados	100
Figura 45 – Variação da temperatura absoluta durante o processo de hidratação	101
Figura 46 – Ápice das reações de hidratação	102
Figura 47 – Ápice das reações de hidratação	102
Figura 48 – Degradação da fibra a 105 °C na parte externa (acima) e interna (abaixo) dos espécimes	103
Figura 49 – Valores médios para o ensaio de índice de vazios realizado a 80 °C	104
Figura 50 – Valores médios para o ensaio de absorção realizado a 80 °C	107
Figura 51 – Valores médios para o ensaio de massa específica realizado a 80 °C	109
Figura 52 – Valores médios para o ensaio de absorção de água por capilaridade	110
Figura 53 – Valores médios de penetração de água por capilaridade	111
Figura 54 – Retração autógena	114
Figura 55 – Retração por secagem	116

Figura 56 – Retração Total	117
Figura 57 – Valores médios para a resistência à compressão	120
Figura 58 – Efeito da macrofibra Barchip e do SAP na resistência à compressão e a relação com o índice de vazios aos 28 dias	121
Figura 59 – Ruptura no formato cônico para espécimes sem fibra (esquerda) e com fibra (direita)	123
Figura 60 – Valores médios obtidos para o ensaio de resistência à tração na flexão	124
Figura 61 – Modo de ruptura dos espécimes durante o ensaio de tração na flexão; acima espécime com fibra e abaixo sem fibra	125
Figura 62 – Comportamento de força <i>versus</i> deslocamento	128
Figura 63 – Tensão residual média encontrada para os traços com adição de macrofibra	129
Figura 64 – Módulo de elasticidade estático médio obtido pelo ensaio de tração na flexão	130
Figura 65 – Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico por impacto . .	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de diferentes tipos de fibras	26
Tabela 2 – Procedimento de mistura para preparo das argamassas para o ensaio de mesa de espalhamento	60
Tabela 3 – Trabalhos relacionados a estudos contendo apenas fibras PP	67
Tabela 4 – Trabalhos relacionados a estudos contendo apenas SAP	68
Tabela 5 – Trabalhos relacionados a estudos contendo SAP e fibras PP	69
Tabela 6 – Características da macrofibra Barchip	75
Tabela 7 – Características do polímero superabsorvente	77
Tabela 8 – Traço da argamassa em kg/m ³	80
Tabela 9 – Nomenclatura adotada para designar os diferentes traços	85
Tabela 10 – Dosagem dos traços em peso	85
Tabela 11 – Dosagem unitária dos traços	85
Tabela 12 – Procedimento de mistura dos concretos	86
Tabela 13 – Resumo da metodologia	87
Tabela 14 – Análise de Tukey para o ensaio de índice de vazios com nível de confiança de 95%: influência do tempo de cura	105
Tabela 15 – Análise de Tukey para o ensaio de índice de vazios com nível de confiança de 95%: influência do tipo de traço	106
Tabela 16 – Análise de Tukey para o ensaio de absorção com nível de confiança de 95%: influência do tempo de cura	108
Tabela 17 – Análise de Tukey para o ensaio de absorção com nível de confiança de 95%: influência do tipo de traço	108
Tabela 18 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traço, com nível de confiança de 95%	110
Tabela 19 – Análise pelo teste de Tukey entre os diferentes traços para as deformações de retração com nível de confiança de 95%	118
Tabela 20 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%	120
Tabela 21 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traços para nível de confiança de 95%	123
Tabela 22 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%	126
Tabela 23 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%	127
Tabela 24 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%	132
Tabela 25 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traços para nível de confiança de 95%	132

Tabela 26 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traços para nível de confiança de 95%	134
--	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
DNIT	Departamento Nacional de infraestrutura de transportes
a/c	Relação água/cimento
a/c_e	Relação água/cimento extra
a/c_{total}	Relação água/cimento total
CAR	Concreto de alta resistência
HSC	High-strength concrete
CI	Cura interna
PP	Polipropileno
SAP	Superabsorbent polymer

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	21
1.2	Objetivos	23
1.2.1	Objetivo Geral	23
1.2.2	Objetivos Específicos	23
1.3	Organização do Trabalho	23
2	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS	25
2.1	Considerações gerais	25
2.2	Tipos de fibras e interação fibra-matriz	26
2.3	A atuação das fibras de polipropileno no desempenho mecânico	30
3	RETRAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS	35
3.1	Hidratação do cimento Portland	35
3.2	Variações dimensionais em compósitos cimentícios	38
3.2.1	Retração autógena	40
3.2.2	Retração por secagem	42
3.2.3	Mecanismos da retração autógena e da retração por secagem	44
3.3	Soluções mitigadoras da retração	47
3.4	A atuação das fibras de polipropileno na retração	50
3.5	Polímeros Superabsorventes como agentes de cura interna	52
3.5.1	Caracterização do Polímero	58
3.5.1.1	Características físicas	58
3.5.1.2	Capacidade de absorção livre	58
3.5.1.3	Capacidade de absorção em meio cimentício	60
3.5.2	Modelo de Powers e o teor de água para cura interna	62
3.6	Uso de fibras de polipropileno e polímero superabsorvente	64
3.7	Síntese dos trabalhos relacionados	66
4	METODOLOGIA	70
4.1	Materiais empregados	71
4.1.1	Cimento	71
4.1.2	Agregado graúdo	71
4.1.3	Agregado miúdo	73
4.1.4	Aditivos	74
4.1.5	Macrofibra Barchip	74
4.1.6	Polímero superabsorvente	76
4.1.6.1	Capacidade de absorção livre	77
4.1.6.2	Capacidade de absorção em meio cimentício	80

4.1.6.3	Propriedades físicas	81
4.1.6.4	Água para a cura interna e teor de SAP	84
4.2	Dosagem, procedimento de mistura e cura dos corpos de prova	84
4.3	Caracterização física e mecânica dos compósitos	87
4.3.1	Liberação de calor de hidratação	87
4.3.2	Retração livre (retração autógena e retração por secagem)	88
4.3.3	Absorção, índice de vazios e massa específica	91
4.3.4	Absorção de água por capilaridade	92
4.3.5	Ensaio de resistência à compressão simples	93
4.3.6	Ensaio de resistência à tração na flexão	94
4.3.7	Ensaio de módulo de elasticidade estático	95
4.3.8	Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por impacto	96
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	99
5.1	Liberação de calor de hidratação	99
5.2	Absorção, índice de vazios e massa específica	103
5.3	Absorção de água por capilaridade	109
5.4	Retração livre (retração total, retração autógena e retração por secagem)	112
5.5	Resistência à compressão	119
5.6	Resistência à tração na flexão	123
5.7	Módulo de elasticidade estático e dinâmico	129
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	136
6.1	Conclusões	136
6.2	Sugestões para trabalhos futuros	138
	REFERÊNCIAS	140
	APÊNDICES	152
	APÊNDICE A – RESULTADOS DE ABSORÇÃO, MASSA ESPECÍ- FICA E ÍNDICE DE VAZIOS	153
	APÊNDICE B – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	155
	APÊNDICE C – RESULTADOS DE RETRAÇÃO LIVRE	157
	APÊNDICE D – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	169

APÊNDICE E – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO	170
APÊNDICE F – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO	172
APÊNDICE G – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO	173

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda da construção civil pelo avanço tecnológico tem impulsionado, nas últimas décadas, diversas descobertas, principalmente a cerca de novos materiais e novas técnicas que surgem no intuito de minimizar o uso de recursos naturais, além de aperfeiçoar o desempenho das estruturas e das técnicas construtivas. Conforme menciona Assmann (2013), um dos grandes avanços foi a descoberta de novos aditivos químicos que permitiram a produção de concretos com melhores desempenhos e elevadas resistências, o que acabou por revolucionar a arte de projetar e construir estruturas de concreto.

A utilização do concreto de alta resistência (CAR), se difundiu devido a necessidade de concretos mais resistentes e com melhor desempenho na durabilidade. Este, apresenta características capazes de superar as limitações do concreto convencional. Dentre as características, destacam-se a alta resistência à compressão, elevada durabilidade, adequada trabalhabilidade, além da possibilidade de construção de elementos estruturais mais resistentes, mais esbeltos e com maior vão livre (SHEN *et al.*, 2018; ANDRADE NETO, 2014). A baixa relação água/cimento, o elevado consumo de cimento e as adições minerais altamente reativas densificam a microestrutura e refinam os poros, o que reduz a permeabilidade tornando o CAR mais resistente aos ataques de agentes agressivos como cloretos, sulfatos, CO₂ e abrasão. No entanto, devido a maior presença de produtos de hidratação, há uma maior demanda de água e uma potencialização da autodessecação, que conseqüentemente elevam o grau de retração autógena (SHEN *et al.*, 2020a; SHEN *et al.*, 2020b; SHEN *et al.*, 2020c). Tais características tornam a estrutura mais suscetível à fissuração precoce que comprometem a estabilidade, durabilidade e estética da estrutura.

O fenômeno de retração pode ser entendido como um processo de contração do compósito cimentício que ocorre devido a perda de água, sem a influência de cargas externas (ONGHERO, 2017), sendo iniciada logo após a moldagem do concreto e finalizada somente após a cura completa. No estado fresco, o concreto possui elevado teor de umidade e sofre contração devido ao processo de secagem, quando exposto à umidade ambiente. Além disso, o concreto experimenta um estresse térmico, devido ao calor de hidratação, o que gera fortes tensões de tração e compressão. Estas deformações de contração agem na forma de tensão de tração, que combinadas com a baixa resistência do concreto no estado fresco, se manifestam na forma de fissuras (IRRIGARAY; BRAZ CÉSAR, 2019).

A retração é um mecanismo inerente as matrizes cimentícias, que está diretamente ligado à durabilidade das estruturas, tornando-se assim, um dos grandes desafios da produção de concretos de alta de resistência. A retração autógena e a retração por secagem, são consideradas como as principais causas de fissuração no

concreto endurecido em idades precoces. Uma vez ocorrida a retração, surgirão as fissuras, que não só afetam a integridade da estrutura, mas também proporcionam o acesso para que as substâncias nocivas do meio ambiente entrem no concreto, através da entrada de gases, vapores e líquidos, acelerando assim a deterioração do concreto, afetando a durabilidade e encurtando muito a vida útil da estrutura (SHEN *et al.*, 2019a).

1.1 JUSTIFICATIVA

Acredita-se que a descoberta do fenômeno da retração tenha ocorrido no início do século XX, no entanto, sua importância foi reconhecida apenas no final dos anos 80 e início dos anos 90, em decorrência, principalmente, do advento do concreto de alta resistência e da retração autógena representar a principal causa da sua fissuração nas primeiras idades (SILVA JÚNIOR, 2017). Desde então, diversas pesquisas vêm sendo realizadas no intuito de mitigar a retração. Dentre as principais medidas pode-se citar: o uso de aditivos redutores da retração, comumente utilizados para combater a retração por secagem (LOPES, 2011), além do uso de adições minerais e de fibras poliméricas. Mais recentemente, o uso de materiais que promovem a cura interna têm ganhado espaço, como a utilização de agregados leves, agregados reciclados e dos polímeros superabsorventes (SAP's) (FAN *et al.*, 2020). No Brasil, pode-se mencionar alguns estudos, tais como os realizados pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com agregados porosos (argila expandida, perlita, vermiculita, casca cerâmica de fundição e cinza pesada), e pela Universidade de Brasília (UnB), onde se emprega o uso de SAP com adições minerais, tais como sílica ativa e nanosílica (MANZANO, 2016; SILVA JÚNIOR, 2017; AGOSTINHO, 2017; SANTOS, 1999).

Os agentes de cura interna apresentam grande aplicabilidade e eficiência, uma vez que fornecem água ao longo do tempo para dar continuidade ao processo de hidratação, reduzindo assim a tensão superficial dos poros e, conseqüentemente, a taxa de retração (FAN *et al.*, 2020). Embora, os agregados porosos possuam capacidade de armazenar água internamente, o polímero superabsorvente se destaca, devido a sua elevada capacidade de absorção e dessorção, podendo absorver até 5000 vezes o seu próprio peso em água, em poucos minutos (BORGES, 2019), além disso é facilmente encontrado e sua aplicação é relativamente simples (LIU *et al.*, 2017).

Os SAP's são classificados como polieletrólitos reticulados, que ao entrarem em contato com a água ou soluções aquosas incham, resultando na formação de um hidrogel (ESTEVES, 2011). Este hidrogel, atua como reservatório interno e como regulador de água dos poros capilares, pois ao liberar água ao longo do tempo, mantém os poros capilares cheios, elimina o processo de autodessecação e conseqüentemente reduz a retração autógena. Desta forma, é considerado um agente de cura com elevada capacidade de reduzir a retração (LIU *et al.*, 2017). Ainda que seja reconhecido, como um agente mitigador da retração, o SAP atua de forma negativa nas propriedades

mecânicas do concreto, pois ao liberar a água do seu interior deixa vazios, que geram pontos fracos e fragilizam a estrutura (YANG *et al.*, 2019b; ZHONG *et al.*, 2019; TAN *et al.*, 2020; LYU *et al.*, 2020).

Como alternativa ao baixo desempenho mecânico do SAP, tem se buscado a combinação de diferentes materiais na tentativa de unir as propriedades de mitigação da retração do SAP com as propriedades mecânicas de outros materiais, como é o caso dos estudos realizados com sílica ativa e nanosílica (MANZANO, 2016; SILVA JÚNIOR, 2017; AGOSTINHO, 2017; SANTOS, 2016). Estes materiais possuem propriedades pozolânicas que reagem com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e levam à formação de hidratos secundários, que elevam a resistência do concreto e suprem a deficiência causada pelo polímero (BALOCH *et al.*, 2019).

Recentemente, alguns poucos pesquisadores têm pesquisado sobre o uso conjunto fibras de macrofibras de polipropileno, principalmente as do tipo Barchip, e do polímero superabsorvente. Seus resultados têm se mostrado satisfatórios tanto para a mitigação da retração, como na manutenção das propriedades mecânicas (OLIVIER *et al.*, 2018; SHEN *et al.*, 2019a; SHEN *et al.*, 2020c), uma vez que as fibras atuam reduzindo a velocidade de exsudação e evaporação da água, agindo como uma barreira física dificultando a movimentação da água (SILVA, 2011). Contudo, o mais revelante dos efeitos das fibras é a sua capacidade de atuar como ponte de transferência de tensões, no qual as fibras costuram as fissuras, com isso, absorvem parte das tensões internas de tração e evitam a propagação do processo de fissuração (SILVA, 2018; KAKOOEI *et al.*, 2012).

De maneira geral, as fibras de polipropileno, assim como o polímero superabsorvente, podem atuar reduzindo a retração do concreto. Ambos com diferentes mecanismos, isto é, as fibras atuam transferindo as tensões e costurando as fissuras do concreto, o que além de reduzir a retração, tende a melhorar o comportamento mecânico, principalmente a ductilidade (DAWOOD; RAMLI, 2010; SHEN *et al.*, 2019b; SHEN *et al.*, 2019a); enquanto o SAP atua promovendo a cura interna, o que reduz a retração e melhora a hidratação do cimento.

Embora seu uso tenha se mostrado relevante, ainda há poucos trabalhos nesta área, revelando que o mecanismo de sinergia entre as fibras e o SAP ainda não está claro, havendo muitas lacunas sobre o efeito combinado e individual destes materiais. Além disso, carecem estudos sobre o uso de polímeros não técnicos, desenvolvidos para outros fins, que não compreendem o uso no concreto, o que revela um amplo campo de descobertas a serem feitas no intuito de otimizar o desempenho mecânico e de retração de concretos de alta resistência.

1.2 OBJETIVOS

Neste item são apresentados os objetivos da pesquisa. O objetivo geral enfatiza o foco principal do trabalho, enquanto os objetivos específicos, destacam pontos importantes que complementam o estudo.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência, isolada e combinada, da utilização de polímeros superabsorventes (SAP) como agente de cura interna e de macrofibras sintéticas em concretos de alta resistência, no intuito de compatibilizar o desempenho mecânico e de durabilidade.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Partindo do objetivo geral do trabalho, foram definidos os objetivos específicos, que visam caracterizar o efeito individual e conjunto da adição da macrofibra Barchip e do agente de cura interna SAP, no intuito de completar o estudo sobre o efeito destes materiais na durabilidade e nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência. Assim, o trabalho dividiu-se nos seguintes objetivos específicos:

- Avaliar, através de um sistema adiabático, como a presença do SAP influencia a liberação de calor de hidratação dos concretos, com e sem a adição de fibra Barchip;
- Analisar a porosidade e conectividade dos poros dos concretos contendo SAP e/ou fibra Barchip, em diferentes idades, através do ensaio de absorção e índices de vazios e do ensaio de absorção de água por capilaridade;
- Analisar como o SAP e macrofibra Barchip, isoladamente e em conjunto, afetam o fenômeno de retração livre, analisando as deformações causadas pela retração autógena, retração por secagem e retração total;
- Verificar o efeito do SAP e das fibras Barchip, de forma isolada e combinada, no desempenho mecânico em diferentes idades e no modo de ruptura dos concretos, através de ensaios de compressão axial, tração na flexão, módulo de elasticidade estático e dinâmico.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado, inicialmente, em 4 capítulos. No Capítulo 1 é exposto, o tema do trabalho, bem como, a introdução e a justificativa para realização

desta dissertação. No decorrer no capítulo são apresentados, o objetivo geral e os objetivos específicos, que delimitam e direcionam a pesquisa.

No Capítulo 2 são apresentados os principais fundamentos do concreto reforçado com fibras, evidenciando seu papel na melhora e na manutenção do desempenho mecânico do compósito final, principalmente quando utilizadas fibras de polipropileno. O Capítulo 3 aborda aspectos gerais acerca da principal problemática deste trabalho, a retração, bem sua classificação e os fatores agravantes. Além disso, são apresentados os principais métodos utilizados, na atualidade, para mitigar este fenômeno, com ênfase nos métodos selecionados para esta pesquisa na busca pela mitigação da retração.

No Capítulo 4 é apresentado o programa experimental proposto para esta pesquisa, incluindo os materiais utilizados para moldagem dos corpos de prova. O capítulo descreve também, a dosagem das misturas estudadas, o processo de concretagem, moldagem, processo de cura e armazenamento das amostras. Além dos ensaios, métodos e normas adotados para a análise da retração autógena, retração plástica e do desempenho mecânico das diferentes misturas.

Na sequência, no Capítulo 5 são apresentados os resultados e análises realizados com base no embasamento teórico descrito nos capítulos anteriores. A partir dos resultados, pretende-se obter subsídios para responder aos objetivos listados no item 1.2 deste capítulo.

Enfim, as considerações finais e conclusões da pesquisa são apresentadas no Capítulo 6. Este capítulo discute, ainda, sugestões para trabalhos futuros, visando à continuação e complementação do estudo.

2 COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos acerca dos materiais compósitos reforçados com fibras, salientando sua atuação frente as propriedades mecânicas. Além disso, são apresentadas com maiores detalhes os conceitos e benefícios das fibras de polipropileno, as quais são foco desta pesquisa.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O concreto de cimento Portland, embora apresente inúmeras vantagens, ainda exibe limitações quanto as suas propriedades, que acabam por impossibilitar o seu máximo desempenho. Segundo Ramos (2002) e Watanabe (2008), o concreto convencional, sem armadura, apresenta baixa resistência à tração, comportamento frágil e baixa capacidade de deformação quando comparado a outros materiais como o aço. Estas características levam a um constante estudo na busca de soluções que visem minimizar estes pontos negativos e tornar o concreto um material com maior desempenho.

No intuito de contornar as limitações do concreto convencional, introduziu-se o conceito de compósitos cimentícios, caracterizados pela combinação de dois ou mais materiais distintos, associados no intuito de aperfeiçoar as propriedades do compósito final (REZENDE; COSTA; BOTELHO, 2011; AGARWAL; BROUTMAN; CHANDRASHEKHARA, 2017). Os mais comuns e conhecidos compósitos são o concreto armado, no qual se utiliza barras de aço para elevar a resistência à tração do concreto, e o concreto fibroso, onde são incrementadas fibras para elevar a ductibilidade do material (FIGUEIREDO, 2011).

As fibras têm o potencial de provocar alterações nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. No estado fresco, as fibras tendem a prejudicar a trabalhabilidade e fluidez da mistura. Para contornar esta situação, geralmente utiliza-se aditivo superplastificante. No entanto, nos casos de concretos com maiores teores de fibras, a adição de aditivo superplastificante pode ser inviável, sendo necessário alterar a matriz cimentícia para melhorar a fluidez do concreto (LEITE; CASTRO, 2020).

No estado endurecido, a principal contribuição da fibra ocorre após a ruptura da matriz cimentícia, quando a fibra fornece resistência residual ao compósito. Normalmente as fibras não conseguem inferir ganhos significativos na resistência mecânica devido ao baixo volume que se incorpora no concreto. Entretanto, após a primeira fissura, as fibras agem como ponte de transferência de tensão, reduzindo a concentração de tensão nas extremidades das fissuras. Com isso, o concreto se torna um material pseudo-dúctil, apresentando maior ductilidade e tenacidade (FIGUEIREDO, 2011).

2.2 TIPOS DE FIBRAS E INTERAÇÃO FIBRA-MATRIZ

As fibras são definidas como elementos descontínuos que possuem geometria e dimensões variadas, e podem ser produzidas a partir de diversos materiais, como aço, polímero e vidro. Uma grande variedade de fibras com diferentes propriedades mecânicas, físicas e químicas, estão disponíveis no mercado e estão sendo utilizadas como reforço de matrizes cimentícias, como mostra a Tabela 1. Estas, podem apresentar-se na forma de monofilamentos soltos ou na forma fibrilar, semelhante à um feixe de filamentos. Além disso, podem agir na forma de reforço contínuo, em que as fibras longas são inseridas na matriz por meio de técnicas, como o enrolamento filamental e a aplicação de camadas de mantas, ou ainda a inserção de fibras curtas soltas, que são introduzidas por pulverização ou por mistura na matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

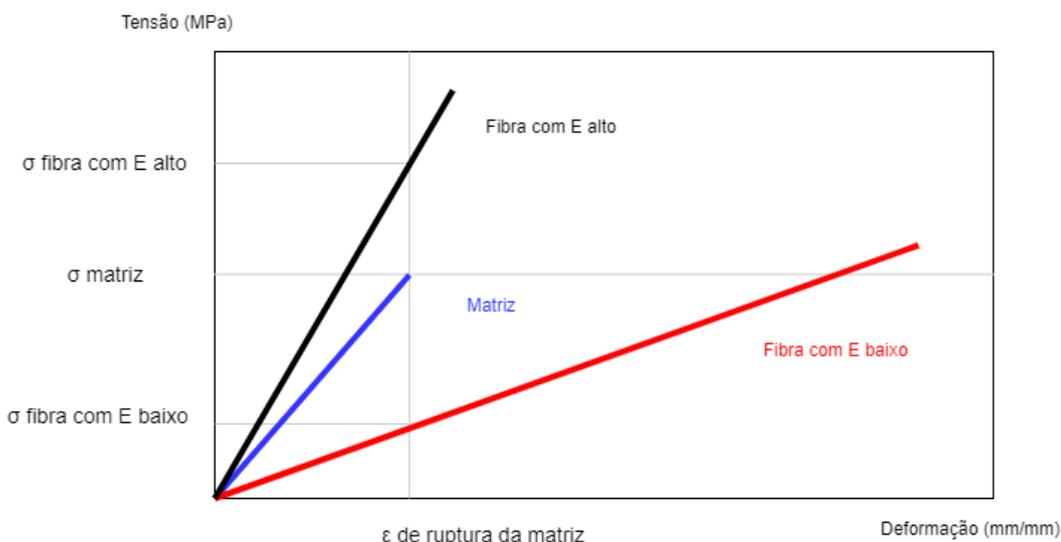
Tabela 1 – Propriedades de diferentes tipos de fibras

Fibra	Diâmetro (m)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Elongação de ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	200	0,5-20	0,50-3,50
Vidro	9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,50
Polipropileno	20-400	0,90-0,95	3,50-10	0,45-0,76	15-25
Aramida	10-12	1,44	63-120	2,30-3,50	2-4,50
Nylon	23-400	1,14	4,10-5,20	0,75-1,0	16-20
Celulose	-	1,20	10	0,30-0,05	-
Sisal	-	1,27-1,50	3,80-62	0,13-0,8	2,80-10
Rami	-	1,51	7,30-25	0,39-0,90	1,80-5,30
Matriz de Argamassa	-	1,50-2,50	10-45	0,003-0,007	0,02

Fonte: Adaptado Bentur e Mindes (2007).

Quanto ao módulo de elasticidade, as fibras podem ser classificadas em: fibras de alto módulo e fibras de baixo módulo, cujas propriedades são definidas pelos materiais constituintes. As fibras de baixo módulo, atuam como reforço secundário, e têm sido empregadas para mitigar a fissuração por retração restringida que comumente surge durante a hidratação inicial do concreto (FIGUEIREDO, 2011). As fibras de alto módulo, agem como reforço primário, tendo a função principal de controlar a propagação de fissuras do concreto no estado endurecido, alterando o comportamento do mesmo após a ruptura da matriz. Com isso há uma melhora na tenacidade, na resistência mecânica e o material passa a apresentar um comportamento dúctil (NETO, 2018). A Figura 1 mostra o comportamento de fibras com diferentes módulos de elasticidade.

Figura 1 – Comportamento de fibras com diferentes módulos de elasticidade



Fonte: Figueiredo (2000).

De modo geral, as fibras capazes de gerar maior reforço são aquelas que apresentam uma maior taxa de deformação e maior resistência à tração em relação à matriz de concreto. No entanto, outras propriedades como teor de fibras, aderência e dimensões são de fundamental importância no alcance das características mecânicas desejadas (COSTA, 2015; FIGUEIREDO, 2000). Tradicionalmente, as fibras metálicas foram muito utilizadas como reforço estrutural, no entanto, com o avanço das pesquisas as macrofibras poliméricas começaram a roubar este papel, ao possuírem propriedades semelhantes as fibras de aço e ainda apresentar menor massa específica e maior resistência a corrosão (LEITE; CASTRO, 2020).

Salvador e Figueiredo (2013) avaliaram de forma comparativa as macrofibras de polipropileno e as fibras de aço, frente ao desempenho mecânico. A macrofibra ($l_f = 54$ mm e $d_f = 0,32$ mm) foi avaliada nos teores de 0,22, 0,33, 0,50, 0,66, 0,82 e 1,0%, enquanto a fibra de aço ($l_f = 60$ mm e $d_f = 0,75$ μ m) nos teores de 0,19, 0,32 e 0,45%. Os autores concluíram que a macrofibra polimérica pode proporcionar o mesmo nível de resistência residual que a fibra de aço, desde que sejam determinados teores com equivalência de desempenho em estudo de dosagem.

O intuito de criar compósitos baseia-se no fato de que ao unir dois ou mais elementos, tem-se ao final um material com propriedades aprimoradas. Neste sentido, quando uma força atua em um material compósito, as tensões solicitantes são redistribuídas e resistidas por ambos os elementos, parte pela matriz e parte pelas fibras. A transmissão dessa carga, ocorre por diferentes mecanismos, dando eles: a interface, interfase e adesão, os quais influenciam nas propriedades mecânicas, como resistência à tração, resistência ao impacto, resistência à flexão e resistência à fadiga (LOPES, 2017).

A interface pode ser definida como a ligação, sem espessura considerável, entre

a superfície da fibra e da matriz. A ligação de interface deve possuir uma resistência maior do que a da matriz sem reforço, para que seja possível a transferência de carga da matriz para a fibra. Já a região de interfase é definida como a área imediatamente adjacente à interface, estendida a uma distância finita na matriz (LOPES, 2017).

A adesão ou aderência é definida como a tensão cisalhante que atua na interface entre a fibra e a matriz que a envolve (LIMA, 2004) e resulta de uma ação combinada de diferentes fatores, sendo eles: a adesão físico-química, uma parcela de ancoragem mecânica e o atrito fibra-matriz. Ambos os fatores, influenciados pelas características da fibra, como volume, geometria e orientação, e por características da matriz, como propriedades físicas e mecânicas e a condição de fissuração (NAAMAN *et al.*, 1991).

As tensões de aderência são fortemente influenciadas pela condição em que a matriz se encontra, fissurada ou não fissurada. As principais tensões geradas são: tensões de aderência por cisalhamento, tensões de aderência por tração e tensões de aderência mecânica. A aderência por cisalhamento é responsável pela transferência de tensões que ocorrem paralelas ao eixo longitudinal da fibra. Quando ocorridas em matrizes fissuradas, as tensões de cisalhamento permitem que a fibra resista ao arrancamento, fazendo com que a carga seja transferida para pontos da matriz ainda não fissurados (LIMA, 2004).

Em um primeiro instante, a aderência por cisalhamento é composta de um componente físico-químico de aderência, onde a aderência é considerada elástica, pois as deformações entre fibra e matriz são compatíveis, e estas são proporcionais à tensão de cisalhamento. Ao passo em que aumentam as deformações, aumentam também as tensões e como consequência há o rompimento da aderência físico-química, que gera a decoesão entre a fibra e a matriz. Quando atingida a tensão de limite de cisalhamento adesional, o principal componente atuante é o atrito, e a aderência de cisalhamento é denominada friccional (LIMA, 2004).

Quando os esforços atuam perpendicular a interface fibra-matriz é a aderência por tração que resiste aos deslocamentos. Estes esforços, ocorrem normalmente devido ao efeito de Poisson, das variações volumétricas e dos carregamentos bi ou tri-axiais (BENTUR; MINDESS, 2007). Já a aderência mecânica, resulta da ancoragem mecânica obtida com a utilização de fibras com ganchos ou de seção geométrica variável, que são utilizadas para incrementar a resistência ao arrancamento dessas fibras (LIMA, 2004).

Com o intuito de produzir compósitos com melhores propriedades, é imprescindível o desenvolvimento de uma boa ligação química e uma boa interação física na interface entre a fibra e a matriz (LEVY NETO; PARDINI, 2006). No entanto, além das propriedades de interação fibra-matriz, propriedades como o teor incorporado, geometria e a orientação das fibras, são determinantes para a produção de um compósito

com características satisfatórias.

- **Teor de fibras:** o teor de fibra é diretamente proporcional a eficácia do reforço no estado de pós fissuração, ou seja, ao aumentar a quantidade de fibras por unidade de volume do compósito, pode-se ter um aumento na capacidade resistente e na tenacidade. Isso ocorre porque as fibras agem como ponte de transferência de tensões, fazendo com que parte da tensão que atua no compósito já fissurado passe para as fibras e assim, as fibras proporcionam resistência residual, e quanto maior a quantidade de fibras maior será a quantidade de pontes de transferência de tensões nas fissuras (BENTUR; MINDESS, 2007; QUININO, 2015). Entretanto, o incremento de altos teores de fibras de polipropileno, aumentam a coesão da mistura e conseqüentemente diminuem a trabalhabilidade e o abatimento (LUCENA, 2017; PINTO JÚNIOR, 2001).
- **Geometria das fibras:** a geometria das fibras é um fator crucial para a qualidade do reforço fibroso, atuando principalmente na aderência entre a fibra e a matriz no estado de pós-fissuração (QUININO, 2015). As propriedades geométricas variam quanto ao comprimento, seção transversal, diâmetro e diâmetro equivalente, em casos de seção não circular.

O conceito de comprimento crítico é definido como, o menor comprimento necessário para que a tensão máxima axial, atuante na fibra, seja igual a tensão de cisalhamento na interface fibra-matriz. Quando este comprimento é menor que o crítico, a resistência ao arrancamento, proporcionado pelo embutimento, não supera a resistência da fibra e assim quando submetida à elevadas deformações e aberturas de fissuras, a fibra que estava atuando como ponte de transferência de tensões, sofre arrancamento da matriz. Entretanto, quanto utilizado comprimentos maiores que o crítico, podem ocorrer problemas, como a perda da mobilidade da mistura e o mecanismo de rompimento da fibra, que ocorre antes mesmo do surgimento das fissuras, reduzindo a resistência residual e a ductilidade do compósito (FIGUEIREDO, 2011).

Desta forma, comercialmente as fibras apresentam comprimento menor que o crítico e atuam segundo o mecanismo de arrancamento. Ainda, recomenda-se que o comprimento da fibra seja aproximadamente igual ou duas vezes a dimensão máxima do agregado utilizado no concreto. Esta compatibilidade dimensional, possibilita que a fibra aja como reforço do concreto e não apenas da argamassa (FIGUEIREDO, 2011).

A geometria da seção transversal influencia no comportamento resistente, uma vez que quanto menor a seção transversal menor será o contato da fibra com matriz, e conseqüentemente menor a carga resistida durante o arrancamento.

Outra forma de avaliar a geometria das fibras, é através do fator de forma, que se baseia na relação entre o comprimento e a seção transversal, e expressa um parâmetro numérico e adimensional. Sendo considerado o mais usado e aceito pelos pesquisadores, este parâmetro é alterado quando ocorrem alterações na geometria das fibras (FIGUEIREDO, 2011). Segundo Mehta e Monteiro (2006) ao elevar o fator de forma, eleva-se também a resistência após a fissuração da matriz, tendo em vista uma aumento na quantidade de fibras.

- **Orientação e distribuição das fibras:** existem, teoricamente, 3 arranjos possíveis para as fibras, sendo eles: 1 dimensão, também chamado de contínuo, 2 dimensões e 3 dimensões. Estes arranjos são configurados pela forma com que a fibra é inserida na matriz, mas também sofrem influência da vibração, geometria da peça e condições de misturas, o que torna difícil garantir a orientação exata (COSTA, 2015).

As fibras orientadas em uma única direção fornecem a matriz alta rigidez e resistência na direção da orientação, enquanto as fibras orientadas em 2 ou 3 direções fornecerão alta rigidez e resistência em ambas as direções (VIEIRA, 2013). De maneira geral, as fibras contínuas ou longas podem ser alinhadas paralelamente (unidirecional), formando ângulos de 90° entre si, ou orientadas em várias direções (multidirecional), sendo, portanto, eficientes para elevar a rigidez e a resistência, entretanto, apresentam elevada anisotropia e seu reforço só é eficiente quando o carregamento é aplicado paralelo as fibras. Já as fibras descontínuas ou curtas podem ser dispersas aleatoriamente ou parcialmente orientadas (QUININO, 2015).

2.3 A ATUAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO NO DESEMPENHO MECÂNICO

O uso de fibras sintéticas vem ganhando destaque e seu uso está cada vez mais frequente no reforço de materiais cimentícios, dentre estas, a fibra de polipropileno está em ênfase, devido as inúmeras vantagens que apresenta. A fibra de polipropileno, assim como a maioria das fibras poliméricas, é originária do petróleo. Seu processo de produção tem início quando ocorre a transformação da nafta petroquímica em propeno, com posterior polimerização deste elemento (C_3H_6). O processo seguinte para obtenção da fibra é a extrusão que consiste em pressionar a resina na forma pastosa, através de furos muito finos em uma peça denominada fiação. Ao final é realizado o estiramento que consiste em estirá-las durante o processo de solidificação e logo após ocorre a solidificação total, e é o responsável pela forma final das fibras (SIQUEIRA, 2006).

Comercialmente, existe uma gama de fibras de polipropileno disponíveis, com diferentes propriedades mecânicas devido as diferenças de geometria e composição.

As fibras de polipropileno se dividem em dois grupos: as macrofibras e as microfibras. As primeiras atuam principalmente como reforço estrutural, melhorando o desempenho mecânico e elevando a ductilidade da matriz. Já as microfibras, atuam em reforço secundário, mitigando a retração e reduzindo a abertura de fissuras. A diferença entre os dois tipos de fibra se dá basicamente pelo formato da fibra e suas características geométricas. A macrofibra apresenta uma estrutura mais robusta, com diâmetro superior a 0,30 mm, enquanto a microfibra apresenta um formato de fios com diâmetro inferior a 0,30 mm (UNE 14889-2, 2008).

Ainda, segundo Figueiredo (2008) as microfibras se dividem em monofilamentos e fibriladas. As fibriladas apresentam-se na forma de malha de finos filamentos de seção retangular, como mostra a Figura 2 (a), o que tende a promover um aumento de adesão entre a fibra e a matriz, devido a um efeito de intertravamento. Já as fibras chamadas de monofilamento consistem em fios cortados em comprimento padrão, conforme mostra a Figura 2 (b), que por possuírem seção individual apresentam melhor dispersão na matriz e um efeito mais eficaz no combate a retração.

Figura 2 – Classificação fibras de polipropileno



Fonte: Abcpolymer (2017).

Recentemente, surgiu no mercado um novo tipo de macrofibra PP, a chamada fibra Barchip, originada de uma modificação no polipropileno que lhe confere maior rigidez e, conseqüentemente, maior módulo de elasticidade. Normalmente são classificadas como macrofibras longas, e apresentam nervuras que melhoram a ancoragem da fibra na matriz. Devido a suas propriedades, as fibras Barchip podem ser empregadas substituindo a armadura tradicional, telas e fibras de aço, permitindo a transferência de tensões e o transpasse de macro e microfissuras, o que confere, além de maior desempenho mecânico a redução da retração (SHEN *et al.*, 2018; SHEN *et al.*, 2019a; SHEN *et al.*, 2020; SHEN *et al.*, 2020c; SHEN *et al.*, 2020b; SHEN *et al.*, 2020a).

Diversas são as vantagens apresentadas pelas fibras de polipropileno, dentre elas destacam-se, no plano técnico, a boa compatibilidade química com a matriz cimentícia, o alto ponto de fusão, a elevada resistência a álcalis e ao fato de não absorver água e não sofrer processo de oxidação e/ou decomposição. Quanto ao

plano econômico, o aumento do uso dessa fibra se justifica pelo baixo custo e ampla disponibilidade, soma-se a isto o fato de que o seu manuseio, tanto na fábrica como na obra, não oferece danos à saúde humana (RODRIGUES; MONTARDO, 2002). Destaca-se, ainda, que o baixo peso específico das fibras de polipropileno tende a reduzir o peso do concreto quando utilizado em altos teores, o que ocorre de forma inversa em outros compósitos, como é o caso das fibras de aço que aumentam o peso do elemento estrutural (SIQUEIRA, 2006).

Em contrapartida, também apresenta algumas desvantagens, como baixa resistência ao fogo, sensibilidade à exposição solar e ao oxigênio, baixo módulo de elasticidade e fraca aderência com a matriz cimentícia (BENTUR; MINDESS, 2007). O fato de apresentar baixa resistência ao fogo, pode ser benéfico em casos de incêndios, pois devido ao derretimento da fibra caminhos de vazios são deixados na estrutura, que fornecem uma porosidade adicional e permitem o alívio das tensões causadas pela evaporação da água e pelas deformações térmicas (BERNARDI, 2003). Noumowe (2005) acrescenta que esta propriedade evita o *spalling*, pois permite a migração da água aprisionada, especialmente em compósitos mais densos, e, desta forma minimiza as tensões causada pela ebulição da água.

No estado fresco, as fibras de polipropileno atuam reduzindo a exsudação do concreto, pois bloqueiam a capilaridade por onde a água se movimenta. Deste modo, além de mitigar a retração por secagem e a retração plástica, proporcionam uma hidratação mais eficiente do cimento, o que eleva a resistência à compressão no primeiro dia, além disso, ocorre uma melhora na deformação por tração nas primeiras horas após o lançamento. Portanto, constata-se a redução no tamanho e na frequência das fissuras e a conservação da resistência interna do compósito (BAYASI; DHAHERI, 2002; KHOURY; WILLOUGHBY, 2008).

As fibras de PP atuam reduzindo a trabalhabilidade, fato que ocorre com a maioria das fibras, uma vez que aumentam a viscosidade do concreto e restringem a movimento dos elementos da matriz de cimento (PAKRAVAN; OZBAKKALOGLU, 2019). Fallah e Nematzadeh (2017) realizaram um estudo e concluíram que as microfibras de PP têm um efeito mais significativo na redução do abatimento de uma mistura de concreto do que as macrofibras de PP. Este fato foi atribuído a maior área superficial específica apresentada pelas microfibras de PP, o que proporciona maior coesão e propriedades de aderência na mistura de concreto. Ainda, segundo Camille *et al.* (2021), as macrofibras Barchip podem levar a uma redução, na trabalhabilidade da mistura, de aproximadamente 40%, quando inseridas em dosagens acima de 1%.

No estado endurecido, ainda não há um consenso sobre o efeito das fibra de polipropileno. Zhang *et al.* (2011) e Medina *et al.* (2014) confirmaram em seus estudos que adição de fibras microfibras de PP no concreto convencional, em qualquer quantidade, reduz a resistência à compressão. Entretanto, Sun e Xu (2009) afirmam que

a adição de fibras de PP com dosagens de até 0,15% não é capaz de afetar a resistência à compressão. Já, Behfarnia e Behravan (2014) afirmam as macrofibras de PP podem contribuir significativamente para elevar a resistência à tração flexão e tenacidade, porém seus efeitos são menos significativos para a resistência a compressão.

Fallah e Nematzadeh (2017) investigaram o efeito de microfibras de PP ($l_f = 12$ mm e $d_f = 19$ μm) e macrofibras ($l_f = 39$ mm e $d_f = 780$ μm , ondulada) no ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Eles concluíram que há um valor ideal para o incremento de fibras de PP. Para as microfibras o teor de até 0,2% eleva a resistência à tração em 12,8%, enquanto o teor de macrofibras pode ser aumentado na mistura em até 1,2% com uma melhora de 27,4%. O emprego de maiores frações de fibras levou a uma queda na resistência.

Camille *et al.* (2021), avaliaram em seu estudo o efeito do teor de fibra e da razão de aspecto de duas distintas macrofibras PP no comportamento de desempenho do concreto. A primeira fibra possuía um módulo de elasticidade de 12 GPa e $l_f = 48$ mm, enquanto a segunda fibra apresentava 10 GPa de módulo e $l_f = 58$ mm. O teor de fibra variou de 0 a 2,0%. Os resultados indicaram que ambas as fibras influenciam drasticamente na trabalhabilidade do concreto, chegando a reduzir em 40% quando utilizado um teor de 1,0% de fibra. Quanto aos resultados mecânicos, a adição da fibra tende a reduzir a propagação da trinca para um comportamento mais dúctil, no entanto, não leva a melhoras consideráveis na resistência à compressão, inclusive, teores acima de 1,5% levam a reduções neste parâmetro. Já na resistência à tração indireta, o incremento das fibras apresenta uma relevante melhora, que cresce na mesma razão da fração volumétrica adicionada, caracterizando assim a interação e a formação da ponte das fibras que fortalecem o concreto.

Quanto a resistência a flexão, Sun e Xu (2009) e Sivakumar (2007) afirmam que a incorporação de um volume de 0,1% de microfibras leva a um ligeiro aumento na resistência à flexão, mas que eleva consideravelmente a tenacidade. Gencil *et al.* (2011) analisaram as propriedades mecânicas do concreto autoadensável reforçado com macrofibras PP de forma ondulada e concluíram que a adição de teores de 0,31% a 1,31% melhoram consideravelmente a resistência à flexão do concreto. De acordo com os resultados, a resistência à flexão da amostra contendo 1,0% de fibras foi elevada em 50,4%.

Sun e Xu (2009) assim como Georgiou e Pantazoupoulou (2016) concluíram em seus estudos, que a adição de fibras de PP pode contribuir de forma eficaz para melhorar as propriedades de durabilidade dos compósitos de concreto, uma vez que reduz a formação de fissuração e a entrada de agentes agressivos. Bernardi (2003) acrescenta ainda, que estas fibras são o meio mais barato, eficaz e simples de combater a fissuração, principalmente em peças com grandes áreas superficiais.

Além de inferir efeitos no desempenho mecânico, as fibras PP apresentam

elevada capacidade de mitigar a retração da matriz cimentícia, sendo mais eficazes que outros métodos comumente utilizados (MONTARDO, 2009). A elevada área superficial, alta dispersividade, capacidade de transferir tensões e a capacidade de agir como uma barreira física para conter a evaporação da água, são os principais fatores que contribuem para o excelente desempenho das fibras diante da retração, conforme é apresentado em maiores detalhes no item 3.4.

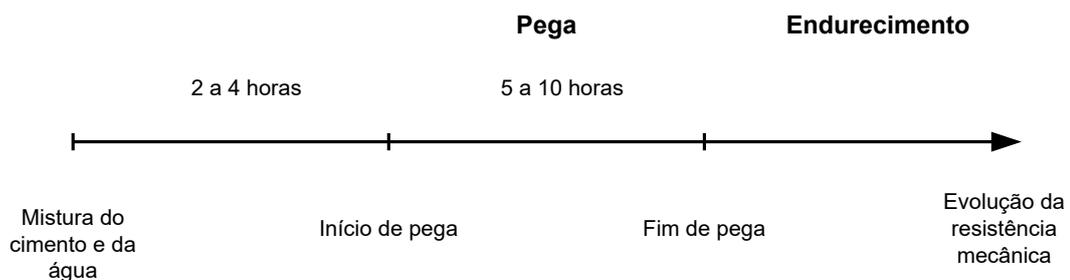
3 RETRAÇÃO EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre os principais conceitos relacionados ao tema de pesquisa. Inicialmente, são descritos, de forma sucinta, os mecanismos geradores de retração, as principais classificações e a sua influência em compósitos cimentícios, além de apresentar os métodos usualmente empregados para mitigar este processo.

3.1 HIDRATAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

De acordo com Scrivener e Nonat (2011), a hidratação do cimento Portland é o processo de transformação da suspensão fluída em um sólido rígido à temperatura ambiente, que ocorre sem a necessidade de calor ou de outros agentes externos e tem como característica a mínima variação de volume em massa. Ainda, segundo Metha e Monteiro (2006), essa mudança de estado físico é causada pela perda gradual da água livre devido às reações de hidratação, pela adsorção física na superfície dos produtos de hidratação de baixa cristalinidade e pela evaporação da água. Ainda, segundo os autores o início de pega marca o tempo em que a pasta se torna não trabalhável, ou seja, perde sua trabalhabilidade, enquanto o fim de pega marca a solidificação completa do cimento. A Figura 3 exemplifica, de maneira genérica, a evolução de hidratação do cimento.

Figura 3 – Representação dos estágios de hidratação do cimento ao longo do tempo

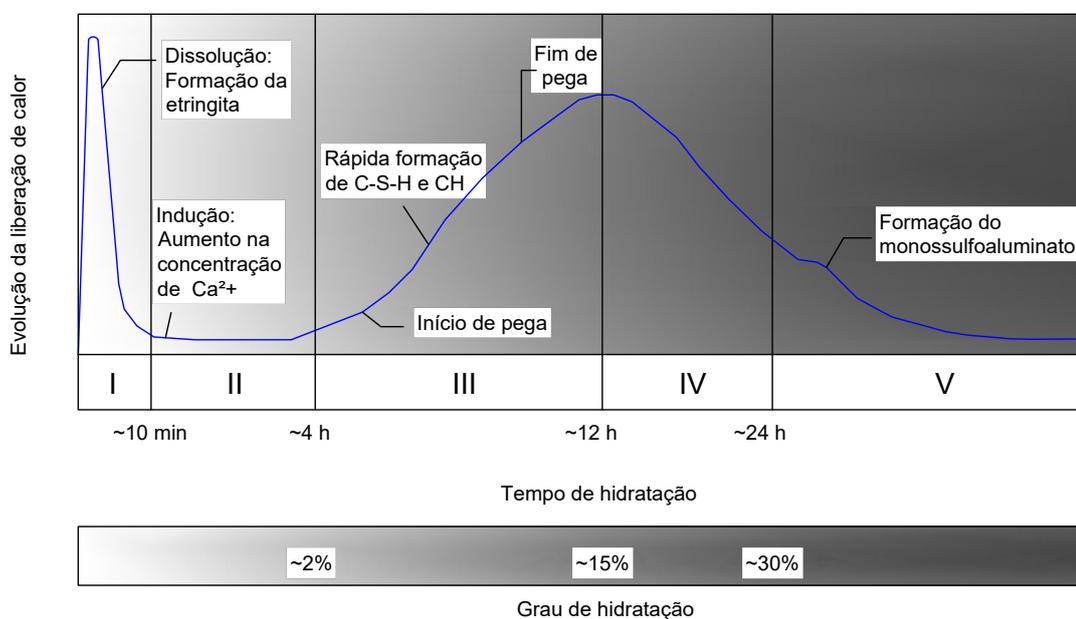


Fonte: Metha e Monteiro (2006).

Outra característica marcante do processo de hidratação é a liberação de calor, correspondente à evolução do calor durante a hidratação do cimento Portland. A quantidade total e as taxas de calor liberado durante a hidratação podem ser utilizadas como índices de sua reatividade, bem como para caracterizar o comportamento de tempo de pega e endurecimento dos cimento. Este processo pode ser dividido em 5 diferentes fases, denominadas como: estágio inicial (I), período de indução (II), período de aceleração (III), período de desaceleração (IV) e estágio final (V) (MEHTA; MONTEIRO, 2006). A Figura 4 ilustra a evolução de liberação de calor durante a

hidratação de uma pasta de cimento Portland de acordo com o tempo de hidratação, revelando a termodinâmica das reações químicas desencadeadas no processo.

Figura 4 – Evolução da liberação de calor de hidratação para uma pasta de cimento



Fonte: Adaptada de Metha e Monteiro (2006).

Durante a fase I, também chamada de estágio inicial, o silicato tricálcico (C_3S) e o aluminato tricálcico (C_3A) entram em contato com água e começam a reagir durante os primeiros 10 minutos. Neste período devido a rápida dissolução dos grãos de cimento com a água, há uma combinação exotérmica que produz o primeiro pico de liberação de calor. Na fase II, conhecida como processo de indução, ocorre uma redução na taxa de reação do C_3S e C_3A , que se traduz pela inercia do sistema. Quando presente o sulfato de cálcio hidratado, a fase etringita começa a formar-se como principal produto de hidratação do aluminato tricálcico (C_3A) (TAYLOR *et al.*, 1997; LURA, 2003).

Na fase III, conhecida como de aceleração, tem início a cristalização do hidróxido de cálcio (portlandita) e da tobermorita, formados a partir da hidratação do C_3S . Durante esta fase tem início também a pega do material, com isso, há um aumento na taxa de liberação de calor, que cresce de forma significativa até atingir o pico máximo. A fase IV, chamada de pós-aceleração, é caracterizada por uma desaceleração da taxa de reação, e neste período há uma contínua formação de produtos de hidratação. Após a fase IV, ocorre apenas uma lenta formação de produtos, por meio de reações de difusão controlada, caracterizando assim a fase V (LURA, 2003; TAYLOR *et al.*, 1997).

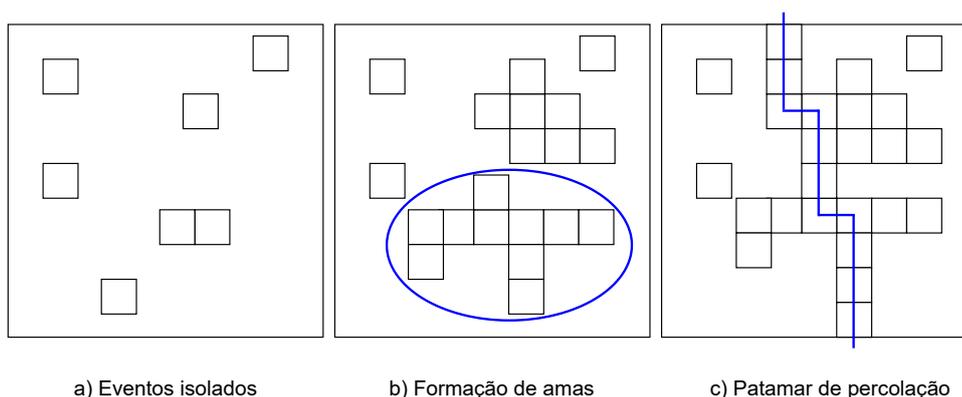
Tendo em vista a complexidade dos processos que envolvem a hidratação, alguns merecem mais atenção, como é o caso da pega. Segundo Rodrigues (2010), este é considerado o período mais importante para evolução das propriedades mecânicas do concreto, pois se caracteriza pelo desenvolvimento do esqueleto do esqueleto rígido.

Nesta etapa, também, começam a surgir os mecanismos de contração e retração. Desta forma, a evolução da hidratação sob o ponto de vista do enrijecimento, a cinética da reação pode ser entendida por três mecanismos, são eles:

Pré- pega: durante esta fase, o concreto passa de suspensão de grãos (fase granular) para um líquido visco-plástico (pasta de cimento) que evolui até formar um esqueleto rígido (SILVOSO, 2003). Também neste período, ocorre o início de outro fenômeno chamado *contração Le Chatelier*, caracterizada pela diminuição do volume absoluto total da mistura em relação ao volume dos constituintes. Isto ocorre devido ao volume de hidratos ser inferior à soma dos volumes iniciais do cimentos anidros e da água. Após a pega, o esqueleto que se forma se opõe à contração por conta de sua crescente rigidez mecânica, resultando em uma contração inferior àquela observada antes da pega (ORDÓÑEZ, 2013).

Pega: caracterizada como o início do endurecimento do cimento, este processo é caracterizado pela formação da etringita e do C-S-H. Nesta fase, começa a surgir a primeira rede de partículas conectadas, esta comunicação entre as partículas pode ser explicada pela teoria da percolação, onde o estabelecimento de uma ligação mecânica entre dois grãos que, inicialmente, se apresentam de maneira aleatória e isolada dentro do volume, evolui para um aglomerado de grãos mecanicamente ligados (formação das amas), para finalmente dar origem ao patamar de percolação, sendo este o primeiro caminho contínuo de grãos que atravessa o conjunto, como mostra a Figura 5 (ACKER (1988) *apud* (SILVA, 2007)).

Figura 5 – Esquema representativo sobre a teoria da percolação



Fonte: Adaptada de Acker (1988) *apud* Silva (2007).

De acordo com Ordóñez (2013), do ponto de vista mecânico, esta é uma das fases mais importante pois, nesse momento, tem início o processo de endurecimento do material, conferindo propriedades mecânicas que até então não existiam à pasta de cimento ou ao concreto. Também, é iniciado o processo de retração, onde começa a haver um esqueleto sólido (patamar de percolação) que exerce resistência à contração da pasta ou do concreto, havendo, portanto, o risco de fissuração. A estrutura do

esqueleto rígido, no momento da pega e o tempo da pega da pasta de cimento, são fortemente influenciadas pelo período da ante-pega, relação água/cimento, natureza e finura do cimento, temperatura e a presença de aditivos minerais e químicos (SILVOSO, 2003).

Pós-pega: nesta fase as reações de hidratação prosseguem em uma cinética desacelerada. Deste modo, a camada de hidratos passa a se formar mais densa, dando continuidade ao processo de endurecimento do cimento. Do ponto de vista mecânico, as reações ocorridas neste período possuem duas consequências principais: o desenvolvimento da fase sólida, que se traduz pela redução da porosidade da pasta, e a diminuição do teor de água, que ocasiona a redução da fase líquida no espaço dos poros, dando início ao processo de autodessecação (BOIVIN, 2001).

3.2 VARIAÇÕES DIMENSIONAIS EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS

O concreto, independentemente da sua composição, está submetido a variações dimensionais ao longo do tempo sofrendo reduções de volume, denominadas retrações, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Em um contexto geral e simplificado, a retração pode ser definida como um processo de contração do compósito cimentício que ocorre devido a perda de água, sem a influência de cargas externas (ONGHERO, 2017). Quando contida, a contração do compósito gera tensões de tração internas e, conseqüentemente, origina a formação de fissuras.

Allena e Newtonson (2011), assim como Holt (2002), definem o processo de retração em duas fases, retração precoce e retração. A retração precoce é um fenômeno que ocorre nas primeiras 24 horas, a partir do início da hidratação, e é definida como a diminuição no comprimento ou volume do material resultante da perda de umidade, redução na temperatura, ou de mudanças químicas. Já a retração, apesar de apresentar a mesma definição da retração precoce e resultar dos mesmos mecanismos, incluindo o processo de carbonatação, começa a ocorrer, apenas, após às 24 horas. Ambos os processos, podem levar à sérios problemas de durabilidade das estruturas.

Nos últimos anos, devido ao extensivo uso dos concretos de alta resistência, a retração passou a ser considerada como um dos principais fatores da fissuração precoce (COSTA, 2015). A fissuração precoce compromete a estrutura desde as primeiras idades, ao permitir o ingresso de agentes agressivos, que causam defeitos estéticos e estruturais e contribuem para deterioração e, conseqüente, redução da vida útil da estrutura (KAKOOEI *et al.*, 2012).

Embora a retração, nos compósitos à base de cimento Portland, apresente relevante influência na estrutura, ainda não há um consenso sobre a nomenclatura adotada para definir este fenômeno. Bastos (2001), ao avaliar argamassas de revestimento, reuniu diversas classificações mencionadas por outros autores e sugeriu a classificação da retração em grupos, identificando-os pelos fenômeno em referência: ao

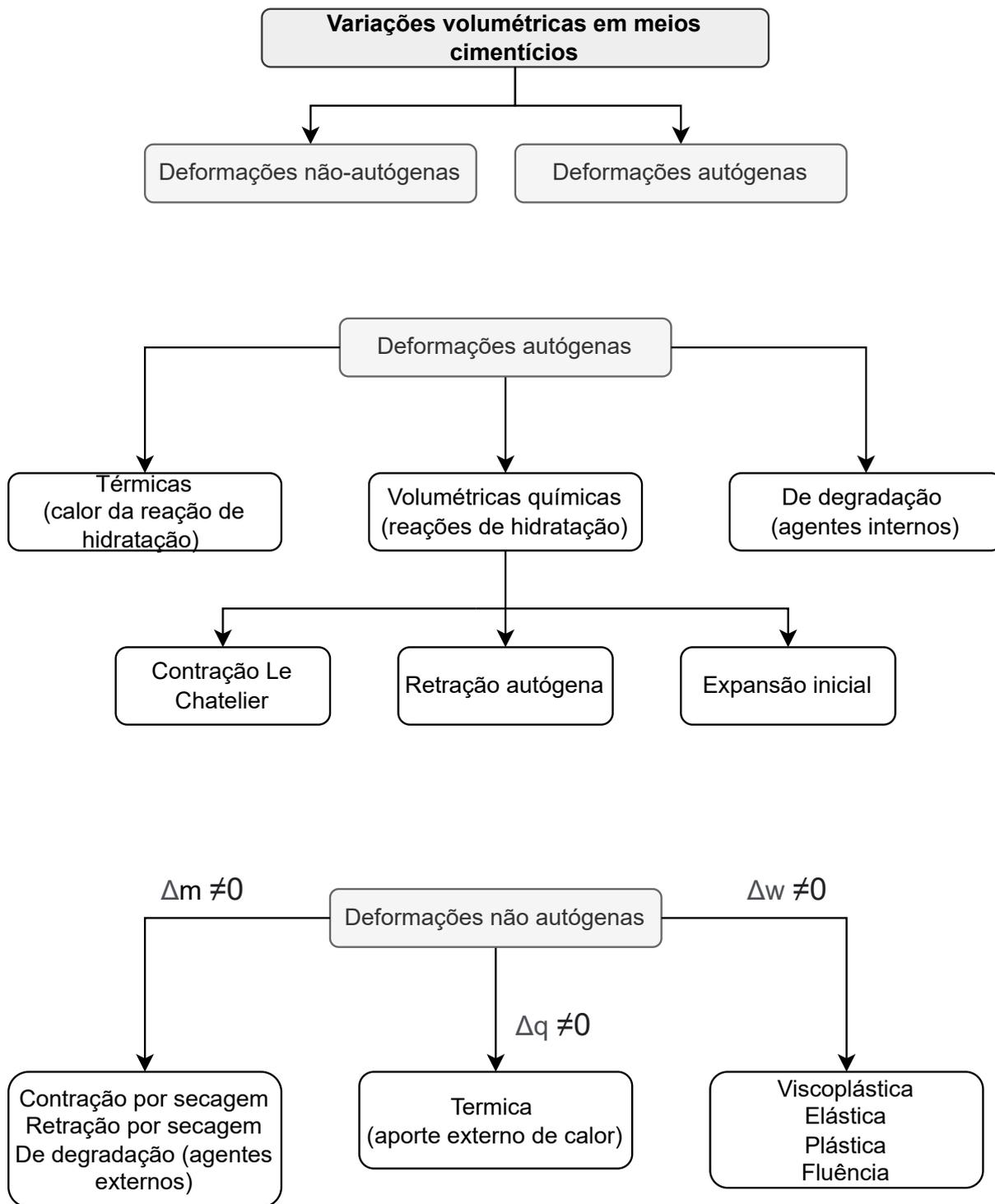
estado físico da mistura, à natureza do fenômeno, ao grau de restrição e a permanência. A classificação é realizada quanto:

- Ao estado físico do material: retração no estado fresco (retração plástica) e retração no estado endurecido;
- À natureza do fenômeno: retração hidráulica, retração química, retração autógena, retração térmica e retração por carbonatação;
- Ao grau de restrição do material: retração livre e retração restringida;
- À permanência do fenômeno: retração reversível e retração irreversível.

Existem, ainda, outras classificações propostas e a mais aceita atualmente no âmbito nacional é a classificação proposta por Silva (2007) que se baseia nos conceitos da termodinâmica. Nesta, o universo é dividido em duas partes: o sistema e sua vizinhança, ambos separados por uma fronteira. As características da fronteira, determinam o tipo de sistema. No sistema aberto, a matéria e a energia são trocadas entre sistema e vizinhança através da fronteira; enquanto, no sistema fechado, há troca de energia, mas há conservação de matéria (massa); já no sistema isolado, não há nenhuma troca entre o sistema e a vizinhança, ou seja, há conservação de massa e energia.

Nos sistemas classificados como aberto e fechado podem ocorrer deformação autógenas e não autógenas, enquanto no sistema isolado somente poderá ocorrer deformações autógenas. A Figura 6 apresenta um organograma com as possíveis derivações para as variações volumétricas. O surgimento de variações volumétricas no material cimentício ocorre em magnitude e tempo particulares e a sua forma de mitigação varia de acordo com o tipo de deformação apresentada (MANZANO, 2016). Desta forma, é de grande importância classificar a retração corretamente para utilizar a metodologia adequada no seu combate. Neste trabalho, devido a forma de execução do ensaio e ao interesse da pesquisa, o enfoque será para a mitigação da retração autógena e da retração por secagem, ambas são consideradas como principais variações volumétricas das deformações autógenas e não autógenas, respectivamente.

Figura 6 – Organograma com a classificação das deformações volumétricas em compósitos cimentícios



Fonte: Silva (2007).

3.2.1 RETRAÇÃO AUTÓGENA

Baseado na classificação adotada, quando se trata de sistemas isolados, podem ocorrer apenas deformações autógenas, que são divididas em três categorias: volumétricas químicas, devido ao balanço volumétrico das reações de hidratação;

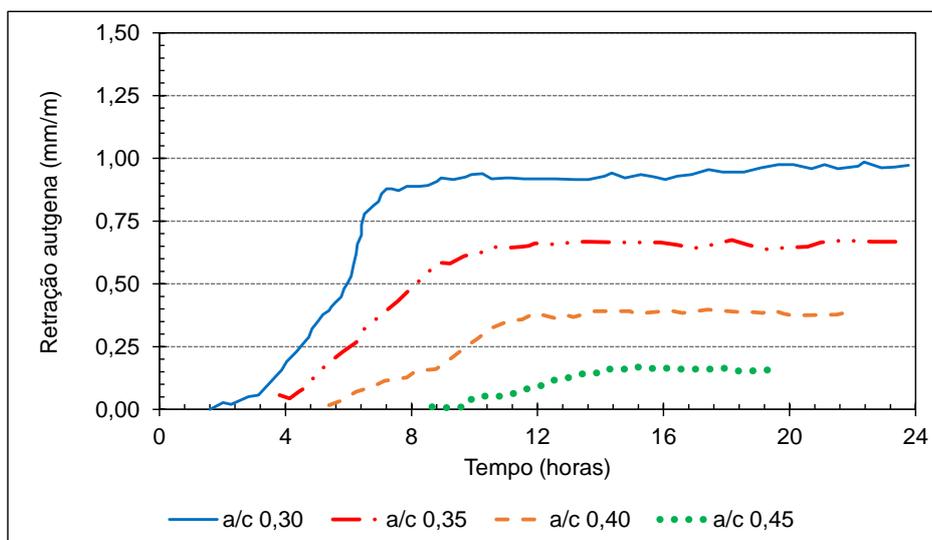
térmicas, devido à liberação de calor proveniente da reação de hidratação e expansivas de degradação, devido a agentes internos, como a reação álcali-sílica, CaO e MgO livres, formação de etringita tardia, com fonte interna de liberação de sulfato (BORGES, 2019; MANZANO, 2016).

De acordo com Lura (2003), as deformações autógenas são responsáveis pela mudança de volume mais significativa em concretos de alta resistência, nas idades precoces, em comparação a outros tipos de deformações. Este tipo de deformação é baseado no estado do material, suspensão ou sólido. Quando em suspensão, a contração de *Le Chatelier* exerce as deformações, quando no estado sólido, estas deformações são classificadas em expansão inicial e retração autógena, foco deste trabalho.

A retração autógena é definida como a redução macroscópica de volume observada em compósitos cimentícios, após atingido o patamar de percolação, provocada pelo mecanismo da autodessecação, que gera tensões capilares nos poros. Este tipo de contração não compreendendo fatores como a alteração de volume devido à perda ou entrada de substâncias, variação de temperatura, aplicação de uma força externa ou restrições, estando relacionado ao consumo da água pelo processo de hidratação (SILVA, 2007; WU *et al.*, 2017).

Quando se trabalha com concretos convencionais, normalmente, a relação a/c é tão elevada que há água em excesso para completar a hidratação do cimento. Logo, os poros ficam saturados durante todo o processo evitando que ocorra o processo de autodessecação, assim o equilíbrio termodinâmico do sistema se mantém inalterado, sem geração da deformação autógena. No entanto, no caso dos concretos de alta resistência, que possuem baixo teor de água (inferior a 0,40) e elevada reatividade, a estrutura formada resulta em poros muito finos, que potencializam a autodessecação, causando uma maior retração (LOPES, 2011; HOLT, 2002). A Figura 3 apresenta um exemplo de influência da relação a/c na magnitude da retração autógena, em argamassas estudadas por Holt (2002).

Figura 7 – Medidas de retração autógena em argamassas com diferentes relações a/c



Fonte: Holt (2002).

Segundo SILVA (2007), à medida que o material inicia o processo de autodessecação induzido pela hidratação do cimento, ocorre a criação de meniscos dentro dos capilares, seguida de uma diminuição progressiva do raio de curvatura desses meniscos, para manter o equilíbrio entre o líquido e a fase gasosa. Assim, surge o fenômeno da variação da tensão capilar, que se acentua à medida que a hidratação se intensifica. Primeiro porque a autodessecação progride dentro do material, atingindo os poros cada vez mais refinados, evidenciado por uma redução na umidade relativa interna. Segundo porque, paralelamente ao fenômeno de saída de água dos poros, a porosidade do material se refina, pela formação de hidratos.

A cinética das reações de hidratação do cimento controlam a evolução da retração ao longo do tempo. Desta forma, os fatores que afetam a evolução da resistência do cimento, como relação a/c, tipo, finura do cimento e uso de fillers, também influenciam na evolução da retração autógena (NUNES, 2006).

3.2.2 RETRAÇÃO POR SECAGEM

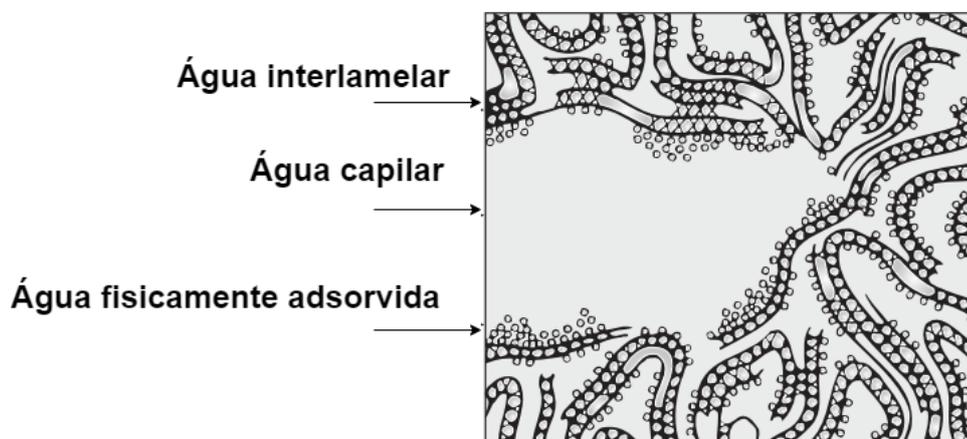
Quando se trata de sistemas abertos e fechados, podem ocorrer deformações autógenas e não autógenas. Se o sistema é aberto, ocorrem variações de trabalho ($\Delta w \neq 0$) e/ou variação de calor ($\Delta q \neq 0$) e/ou com variação de massa ($\Delta m \neq 0$, com fluxo de umidade e de outros íons), podendo, portanto, gerar as três categorias de deformações não autógenas. Se o sistema é fechado, podem ocorrer as deformações não autógenas devido à $\Delta q \neq 0$ e $\Delta w \neq 0$. Deformações térmicas podem ocorrer se houver variação de calor, originadas pelas variações de temperatura em relação às condições do ambiente externo. Deformações viscoelásticas, elásticas, plásticas e por fluência, decorrem da variação da energia de trabalho. Por fim, havendo variação de massa, podem ocorrer

contração por secagem, quando material está no estado fluido, ou quando o material se comporta como sólido, deformação por secagem e deformações expansivas de degradação, com aporte externo de íons, devido à formação de etringita tardia, retração por carbonatação e reação expansiva de $Mg - S - H$ com perda de massa (SILVA, 2007).

O mais conhecido dos fenômenos de retração e provavelmente um dos mais importantes é a retração por secagem. Também conhecida como retração hidráulica, este fenômeno consiste na contração irreversível de compósitos porosos, que ocorre devido a evaporação da água interna da matriz, causada pela baixa umidade do ambiente externo (TOLEDO FILHO *et al.*, 2005). Normalmente, a quantidade de água adicionada à mistura é bem maior do que a estritamente necessária para a hidratação do concreto, este excesso de água garante a trabalhabilidade. Portanto, parte da água adicionada à mistura não será quimicamente ligada à parte sólida da pasta, estando disponível na mistura. Quando o compósito cimentício é exposto à uma umidade relativa mais baixa que a umidade inicial do composto, começa a ocorrer o processo de migração da água, que cria um gradiente de umidade que atua como uma força motriz para que a água excedente migre para o meio, ocorrendo uma redução do volume dos poros do concreto devido ao processo de secagem.

A retração por secagem normalmente ocorre em etapas, e depende da maneira com que a água é eliminada. As etapas são classificadas de acordo com o grau de dificuldade ou facilidade da retirada da água e dividem-se em: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada, como mostra a Figura 8 (ACKER; TORRENTI; GUÉRINET, 2014).

Figura 8 – Classificação da água em relação a sua dificuldade de movimentação dentro do compósito



Fonte: Nunes (2006).

Segundo Mehta e Monteiro (2006) o processo de secagem é iniciado quando a umidade relativa está abaixo de 100%. A primeira água a ser evaporada é a água capilar, pois se encontra livre das forças de atração exercidas pela superfície sólida,

na sequência ocorre a perda da água adsorvida, que está fisicamente adsorvida na superfície de sólidos na pasta de cimento hidratado, sendo esta responsável pela retração da pasta. Se a umidade continuar a diminuir e atingir valores abaixo de 11% a água interlamelar é então evaporada, este tipo de água é ligada a estrutura C-S-H e sua evaporação ocasiona a retração da estrutura. A água quimicamente combinada, é parte integrante da microestrutura de vários produtos de hidratação de cimento e, portanto, não é evaporada durante a secagem, apenas é eliminada quando o aquecimento decompõe os hidratos. Segundo Helene e Andrade (2010) e Milagres (2019), os principais fatores que afetam a secagem do compósito são:

- Agregados: atuam restringindo a deformação e assim fissuras são geradas;
- Relação água/cimento: um aumento na relação a/c implica na diminuição na resistência do concreto, e, portanto, no seu módulo de elasticidade;
- Adições e aditivos: algumas adições podem levar a um aumento no volume de poros finos, facilitando a percolação e evaporação da água;
- Condições ambientais: a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, influenciam diretamente na taxa de evaporação e na perda de umidade da superfície do concreto;
- Geometria do elemento de concreto: quanto maior é o caminho que a água interna ao concreto tem que percorrer para atingir a superfície do elemento, menor é a taxa de perda de água.

Uma das alternativas para mitigar a retração por secagem, ou até mesmo evita-lá, é a aplicação do processo de cura, que deve iniciar juntamente com o início das reações de hidratação do cimento, com atenção especial aos cimentos de alta resistência inicial. O procedimento eficiente de cura, no combate à retração por secagem, não precisa contemplar o suprimento de água para ser absorvida pelo material, mas simplesmente deve impedir a perda de água da superfície do mesmo. Desta forma, a simples cura convencional saturada em água e cal é eficaz, uma vez que protege a superfície e evita a troca de umidade com o ambiente circundante (KUMM *et al.*, 2012).

3.2.3 MECANISMOS DA RETRAÇÃO AUTÓGENA E DA RETRAÇÃO POR SECA- GEM

Sabe-se que há uma forte relação entre a diminuição da umidade relativa no interior dos poros dos meios cimentícios e a retração. No entanto, os mecanismos que conduzem o surgimento deste fenômeno ainda causam controvérsias entre os pesquisadores do tema (LURA, 2003). Os mecanismos mais aceitos, atualmente, para explicar a movimentação da água na pasta e o surgimento da retração envolvem a

variação da tensão capilar, a variação de tensão de superfície de partículas coloidais e a variação da pressão de disjunção.

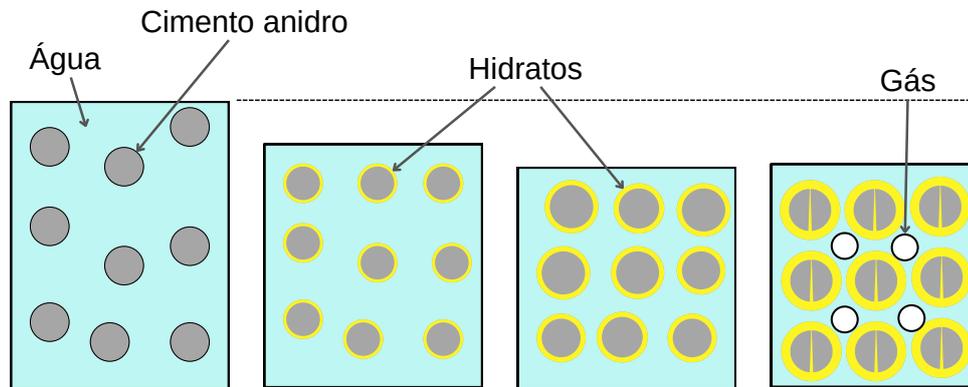
Apesar de todos os mecanismos mencionados exercerem influência na retração autógena, a variação da tensão capilar merece atenção especial, já que é o principal desencadeador do processo de autodessecação. A autodessecação promove a formação de soluções líquido/gás nos poros, estabelecendo a tensão capilar, que é um gradiente de pressão resultante da formação de meniscos (ANDRADE NETO, 2014).

Por definição, a autodessecação ou autossecação é a redução da umidade relativa do compósito após a pega, resultante das reações de hidratação que, ao consumirem água dos poros, aumentam o volume dos poros vazios (ANDRADE NETO, 2014). Esta variação no volume dos poros é devido aos produtos de hidratação do cimento apresentarem um volume menor do que os seus reagentes, também conhecida como contração de *Le Chatelier*. Desta forma, o efeito combinado do aumento de volume dos poros vazios e a saída de água dos poros para promover a hidratação provocam a formação de meniscos na interface água/gás nos poros não saturados, provocando uma tensão capilar que aproxima as partículas de cimento hidratado uma das outras, causando a retração (JENSEN; HANSEN, 2001).

Durante o período de suspensão, a pasta de cimento ainda é fluida, e as reduções de volume ocasionadas pela hidratação não encontram resistência, desta forma, apenas o volume global diminui. À medida que a pasta vai endurecendo, o patamar de percolação é gerado, e as variações volumétricas começam a encontrar resistência pelo esqueleto mineral. Quando formado, o esqueleto mineral impede as reduções de volume, gerando, assim, espaços vazios nas porosidades dos capilares da pasta, diminuindo o teor de água, ocasionando a autodessecação (ANDRADE NETO, 2014; KUMM *et al.*, 2012). A Figura 9 ilustra as consequências do processo de hidratação.

De forma análoga ao mecanismo de retração autógena, a retração por secagem é fortemente influenciada pela variação da tensão capilar. Em um contexto geral, o processo de autodessecação é idêntico ao processo de secagem, desencadeador da retração por secagem, isto porque ambos ocasionam uma redução da umidade relativa interna do material. Na autodessecação, a água é consumida pela reação química de hidratação, enquanto na secagem, água é removida dos poros devido a variação do gradiente entre a umidade interna do material e a umidade do ambiente circundante (SILVA, 2007).

Figura 9 – Conceito simplificado da autodessecação, como consequência do avanço da hidratação

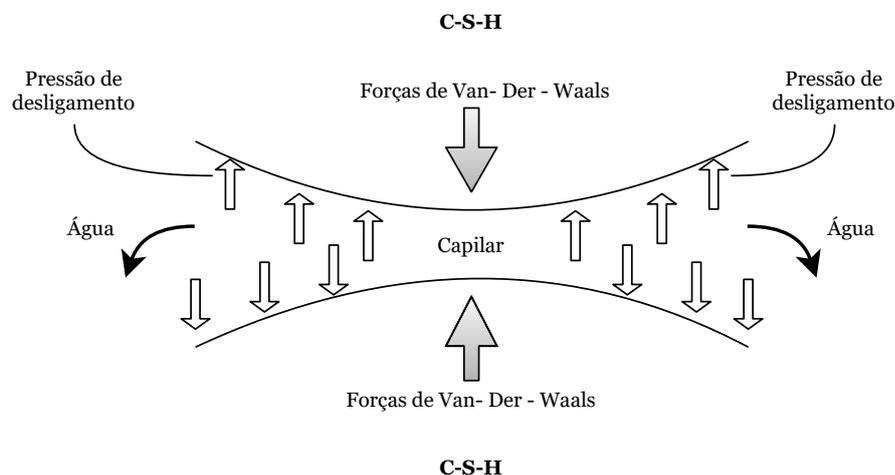


a) redução da quantidade de água nos poros, pela incorporação aos produtos da hidratação; b) aumento da quantidade de matéria sólida; c) refinamento da estrutura de poros; d) formação dos poros vazios pela retração química; e) diminuição do raio de curvatura dos meniscos, e; f) grande retração gerada pelo aumento das tensões capilares nos poros: retração por autodessecação.

Fonte: Adaptada de Nawa e Horita, (2005) apud Ordóñez (2013).

- **Pressão de disjunção:** a pressão de disjunção é criada pela adsorção de água nos cristais de C-S-H. Este fenômeno resulta da orientação das moléculas de água, e forma uma espécie de filme entre as camadas. A medida que aumenta a espessura da camada de água adsorvida, a pressão de disjunção aumenta. Desta forma, quando há um filme espesso entre as duas camadas, as forças de atração de Van der Waals, que tendem a atrair as partículas de C-S-H entre si, mantém as partículas afastadas. Com a perda de água, o filme de água adsorvida gradativamente vai reduzindo de espessura e reduzindo também, a pressão de disjunção. Assim, as partículas de C-S-H voltam a ter atração entre si e ocorre então a contração volumétrica da estrutura, mostrado na Figura 10, (NUNES, 2006; DOMONE; ILLSTON, 2010).

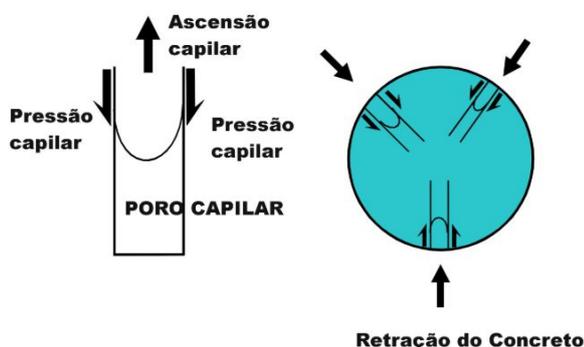
Figura 10 – Pressão de disjunção quando da perda de água entre os cristais de C-S-H



Fonte: Nunes (2006).

- Energia superficial ou tensão superficial: pela definição a energia superficial é o trabalho necessário para aumentar a superfície por unidade de área. A superfície de materiais sólidos e líquidos estará em um estado de tensão devido às forças de atração das moléculas líquidas dentro do material. A adsorção de moléculas de água na superfície das partículas reduz a energia da superfície, bem como, reduz as tensões compressivas internas de equilíbrio, levando a um aumento de volume geral do composto. Quando está água é eliminada do material, a energia superficial aumenta, assim como as forças compressivas que levam a uma contração e consequente fissuração. Este tipo de fenômeno não ocorre em umidade relativa acima de 40%, pois não há pressão de desligamento nem tensões capilares (DOMONE; ILLSTON, 2010).
- Tensão capilar: quando a pasta de cimento começa a perder água, ocorre a movimentação capilar da água nos poros capilares. Como consequência, a superfície livre se torna mais côncava e a tensão superficial aumenta, assim são induzidas forças de compressão no interior da estrutura sólida, que resultarão em uma diminuição do volume, conhecida por retração. As tensões hidrostáticas são desenvolvidas quando um menisco é formado no capilar, como mostra a Figura 11. Em condições em que a umidade relativa acima de 50% não são desenvolvidas tensões capilares, pois nesta situação os meniscos estão estáveis, entretanto, pastas com alta relação água/cimento possuem maior risco de retração, devido a elevada porosidade, assim como, quanto mais refinados os poros, menores são os raios dos meniscos que geram maiores pressões capilares (DOMONE; ILLSTON, 2010).

Figura 11 – Tensões hidrostáticas desenvolvidas em meniscos capilares do concreto



Fonte: Nunes (2006).

3.3 SOLUÇÕES MITIGADORAS DA RETRAÇÃO

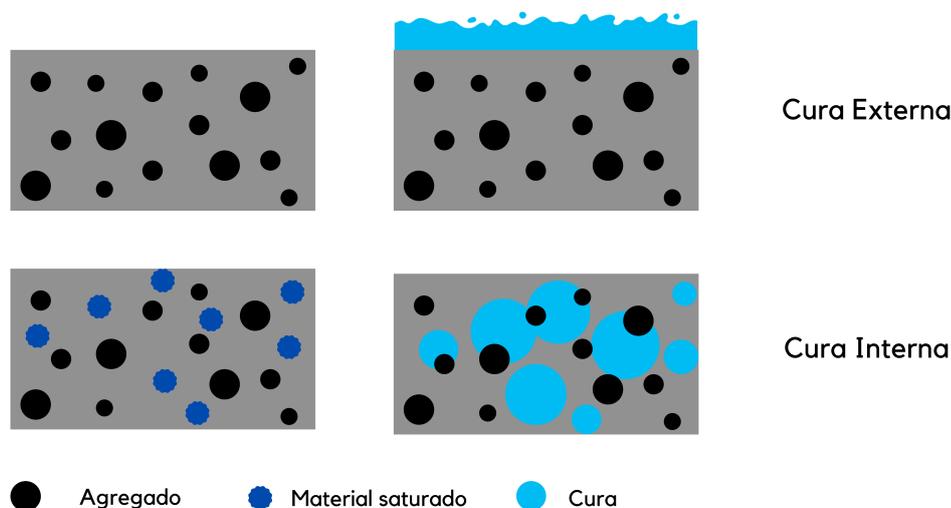
Dentre as medidas que podem ser tomadas para que a retração seja minimizada, a mais comumente utilizada é a cura externa. O processo de cura objetiva potencializar a hidratação do cimento, permitindo que a umidade seja mantida por um

maior período de tempo devido a redução da evaporação e, com isso, as propriedades estruturais e de durabilidade são atingidas (KOPPE, 2016). Este processo é realizado com a finalidade de proteger a superfície de um elemento estrutural de temperaturas elevadas, da dessecação prematura, impacto ou desgaste prematuro e de evitar a evaporação de água da mistura destinada a hidratação do cimento (FIGUEIREDO, 2008). Resumidamente, a cura busca promover a máxima hidratação do cimento e a redução da retração e dos fatores intrínsecos à durabilidade.

A cura externa com água ou película seladora, cujo objetivo é manter a superfície da amostra livre de trocas de umidade com o ambiente, é muito efetiva para reduzir a retração por secagem. No entanto, Mechtcherine e Dudziak (2012), assim como Bentz e Jensen (2004), mencionam que a cura externa do concreto pode não contribuir substancialmente para mitigação da retração autógena quando se trata de concretos com uma baixa relação água/cimento, mesmo se for aplicada de forma intensiva. O concreto de alta resistência apresenta uma microestrutura típica muito densa, mesmo em idades precoces, o que impede o transporte suficientemente rápido da água de cura externa para o interior dos elementos de concreto, especialmente para peças com dimensões elevadas. Tendo isto em vista, tem sido proposta a utilização da cura interna pela adição de materiais com alta capacidade de armazenamento de água na mistura de concreto, os quais suprem água para a matriz circundante enquanto ocorre a autodessecação.

A cura interna pode ser definida, segundo o *American Concrete Institute* (ACI) (2013), como o processo pelo qual a hidratação do cimento é mantida devido presença de água interna que não faz parte da água de amassamento e advém de reservatórios internos inclusos na mistura. Materiais que absorvem água, como polímeros superabsorventes, aditivos e agregados leves, são considerados agentes de cura interna, devido a sua capacidade de reter água e liberar apenas quando a umidade relativa interna decai. Devido à disponibilidade uniforme de água no concreto, as reações de hidratação dos materiais cimentícios complementares são aumentadas e as tensões capilares são minimizadas, assim como a retração autógena (BYARD; RIES, 2012; WU *et al.*, 2017). A Figura 12 ilustra de forma simplificada a diferença entre o processo de cura externa e cura interna.

Figura 12 – Conceito simplificado de cura externa e interna



Fonte: Adaptada de Bentz e Weiss (2011).

Dentre os materiais para a cura interna, o SAP e os agregados leves saturados se destacam devido a ampla disponibilidade. No Brasil, os agregados leves são mais explorados devido ao baixo custo, uma vez que os polímeros são em maioria importados o que eleva o custo e dificulta a ampla utilização. Entretanto, o SAP se destaca pela sua elevada capacidade de absorção e dessorção, e pela simplicidade da técnica (LIU *et al.*, 2017). Atualmente, o uso desse material tem ganhado destaque, devido à suas propriedades benéficas, principalmente no que diz respeito a redução da retração nas primeiras idades e a continuidade do processo de hidratação (SHEN *et al.*, 2016; YANG *et al.*, 2019b; ZHONG *et al.*, 2019, 2019; TAN *et al.*, 2020).

Além dos processos de cura, existem outras alternativas para minimizar a retração, como é o caso do uso das adições minerais, onde as partículas de pozolana que não reagem com a água servem como microagregados, preenchendo os espaços vazios, impedindo assim a perda de umidade interna (TRAN *et al.*, 2021). Além disso, os materiais pozolânicos com granulometria fina refinam a estrutura dos poros da matriz e provocam a formação de um gel extra denso de silicato de cálcio-hidrato que melhoram a interface do compósito (HAN *et al.*, 2012). E o uso de aditivos redutores da retração que reduzem a tensão superficial da água nos poros parcialmente saturados e assim reduzem a retração, principalmente a retração por secagem (LOPES, 2011).

Outra alternativa para mitigar a retração, que devido a sua complexidade é muitas vezes esquecida, é a redução do consumo de cimento e a variação do tipo de cimento utilizado. Uma vez que, o moderado consumo de cimento em misturas, normalmente limita a geração de calor na hidratação e a retração plástica, no entanto, ao passo que este consumo aumenta, os seus efeitos também se elevam. Concretos de alto desempenho ou de alta resistência são acometidos por maiores taxas de retração, devido ao elevado consumo de cimento e ao uso de cimentos com maior finura e com

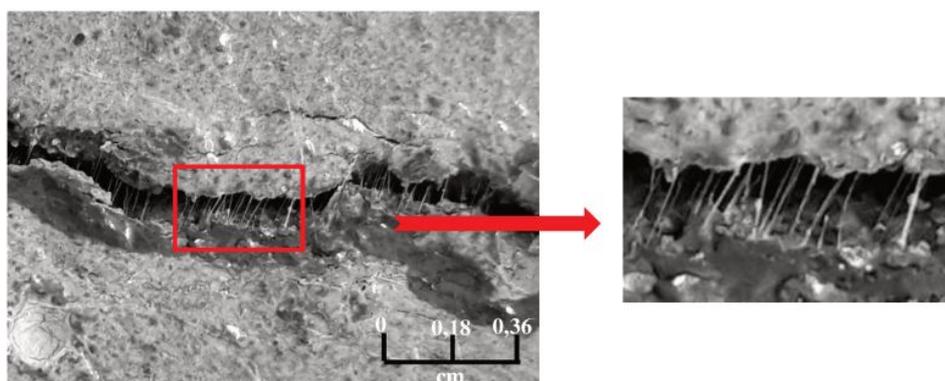
maior calor de hidratação, normalmente o cimento o CPV. O uso de tais materiais refinam a estruturas de poros, que por sua vez aumentam a retração autógena e a retração plástica (ONGHERO, 2017).

Há ainda, o uso do fibras poliméricas, mundialmente empregadas para reduzir a retração devido ao seu potencial de transferir as tensões e de costurar as fissuras (PAKRAVAN; OZBAKKALOGLU, 2019). Principalmente as fibras de polipropileno, que devido as suas características únicas são as mais utilizadas. Mais recentemente, o uso combinado dos diferentes agentes redutores da retração tem sido empregados, na busca por melhores resultados na mitigação da retração e no desempenho mecânico.

3.4 A ATUAÇÃO DAS FIBRAS DE POLIPROPILENO NA RETRAÇÃO

A adição de fibras distribuídas aleatoriamente, é uma técnica amplamente aceita para controlar a fissuração por retração, principalmente a retração plástica (BERTELSEN; OTTOSEN; FISCHER, 2020). As fibras atuam reduzindo a velocidade de exsudação e evaporação da água, entretanto, diferentemente da cura interna, em que parte da água é armazenada em reservatórios internos, o material fibroso age como uma barreira física dificultando a movimentação da água e assim minimizando a taxa de evaporação (SILVA, 2011; WU *et al.*, 2017). Além disso, as fibras atuam como uma ponte de transferência, costurando as fissuras, além do papel de transferir as tensões internas de tração, as fibras atravessam as pequenas aberturas e evitam a propagação do processo (SILVA, 2018; KAKOOEI *et al.*, 2012), como exemplifica a Figura 13.

Figura 13 – Fibras atuando na transferência de tensões



Fonte: Silva (2018).

Diversos pesquisadores buscam combinar diferentes métodos de mitigação da retração, no intuito de obter melhores resultados. Nesse sentido, as fibras de polipropileno normalmente estão presentes, como é o caso de Cao *et al.* (2020), que avaliaram o efeito combinado das fibras PP retas ($df=0,07$ mm e $lf=19$ mm), agentes expansivos e agregados leves saturados. Os autores comprovaram, através da análise

individual de cada agente, que a fibra PP se sobressai, apresentando os melhores resultados. Por outro lado, no uso combinado, as misturas mostraram resultados mais efetivos na retração do que individualmente, evidenciando melhora no tempo de fissuração inicial, na largura e comprimento das fissuras e, principalmente, na área total fissurada. Entretanto, existe um limite benéfico destas adições. Para teores acima de 0,1% de fibra PP, a adição de agente expansivo ou de agregados leves saturados não exerceu efeitos significativos.

De forma semelhante, Mohammadhosseini *et al.* (2020) estudaram o efeito combinado das fibras PP e da cinza de óleo de palma, no desempenho de retração por secagem do concreto. Os autores utilizaram, neste trabalho, fibras de PP oriundas de resíduos de carpetes, sendo consideradas como multifilamento com $df = 0,45$ mm e $lf = 20$ mm. As adições de fibras PP variaram nos teores de 0% a 1,25% e em ambos os teores evidenciaram melhoras na na retração, entretanto, o resultado mais efetivo foi observado para a mistura de 0,75% de fibras PP combinado com a substituição 20% de cinza de óleo de palma, o qual teve um diminuição de 23,3% na retração por secagem. Quanto a resistência mecânica, as fibras reduziram a resistência à compressão conforme o aumento dos teores, devido principalmente a presença de bolhas de ar que se formaram durante a compactação, enquanto a resistência à tração elevou-se.

Gong, Zeng e Zhang (2018) avaliaram o efeito combinado e isolado das fibras de polipropileno e do agente redutor de retração na mitigação da retração em uma mistura de concreto celular. A fibra utilizada possuía um $df = 18-45 \mu\text{m}$ e $lf = 19$ mm e o seu teor variou em 0,2%, 0,3% e 0,4%, enquanto o agente variou em 2%, 3% e 4%. Após os ensaios, observaram à medida que o agente aumenta, a microexpansão inicial também aumenta, o que geralmente é uma situação desfavorável. Já o aumento das fibras PP leva a uma microexpansão precoce, sendo que a autorretração e a retração por secagem diminuem. Entretanto, os melhores resultados foram encontrados para a combinação de 3% do agente e 0,3% de fibras PP, pois a fibra consegue compensar a microexpansão causada pelo agente.

Uma ampla pesquisa foi desenvolvida por Banthia e Gupta (2006) sobre a influência da geometria das fibras de polipropileno na retração e fissuração plástica do concreto. Foram empregadas na pesquisa 4 tipos de fibras, sendo elas: monofilamento com $df = 3$ denier e $lf = 12,5$ mm, monofilamento com $df = 6$ denier e $lf = 12,5$ mm, monofilamento com $df = 6$ denier e $lf = 6,35$ mm e fibrilar com $df = 1000$ denier e $lf = 6,35$ mm, avaliadas em teores de 0,1%, 0,2% e 0,3%. Os resultados evidenciaram que fibras mais longas e mais finas apresentaram melhor desempenho na mitigação da retração, devido a maior área superficial, que resulta em uma maior transferência de tensão de tração entre a matriz e a fibra. No entanto, a fibra fibrilada mostrou-se superior a fibra de monofilamento, o que decorre de uma ancoragem mecânica mais eficaz e de

uma melhor dispersão das fibras na massa de concreto. Sendo o volume de fibras, proporcional a eficiência do reforço frente a fissuração, em todos os casos.

De modo semelhante, Shen et al. (2020) avaliaram o efeito da geometria das fibras PP no comportamento do concreto. Os autores concluíram que ao variar o comprimento da fibra de 42 mm para 54 mm e de 42 mm para 60 mm, houve uma redução na temperatura no momento de retração de 11,1% e 14,8%, respectivamente. Além disso, este aumento no comprimento da fibras, reduziu o valor absoluto de retração autógena em 14,9% e 28,4%, respectivamente. Quanto a resistência mecânica, observaram que o aumento no comprimento, elevou a resistência à tração, assim como o módulo de elasticidade e a resistência à compressão aos 28 dias. No entanto, reduziu a resistência à fissuração, baseado no sistema integrado que avalia a relação entre o tempo de fissuração pela taxa de tensão de tração restrita. Segundo os autores, isso ocorreu devido ao fato que as fibras longas provocam uma distribuição desigual, gerando defeitos internos e uma distribuição desigual das tensões.

Apesar de ainda não haver muitos estudos, as fibras Barchip vem se mostrando como uma alternativa promissora para reduzir a retração de matrizes cimentícias e ainda elevar seu desempenho mecânico. Shen *et al.* (2018), estudaram o efeito de diferentes adições de fibra Barchip no concreto de alta resistência. Os teores adicionados foram de 0 kg/m³, 4 kg/m³, 8 kg/m³, 12 kg/m³ e as amostras foram submetidas à ensaios de retração e de resistência mecânica. Os resultados revelaram que o aumento no teor de fibras levou a ganhos significativos na resistência mecânica e ainda reduziu o potencial de fissuração em 18,4%, 31,6% e 13,2% quando a quantidade de fibras Barchip aumentou de 0 para 4, 8 e 12 kg/m³, respectivamente, além de redução na retração livre e restringida. No entanto, os autores concluíram que a adição de 8 kg/m³ revelou-se superior as demais adições principalmente frente a retração, uma vez que maiores teores dificultam a dispersão.

De forma semelhante, Shen *et al.* (2020a) e Shen *et al.* (2020b) avaliaram em seus estudos três diferentes teores da fibra Barchip (0,3%, 0,6% e 0,9%) no concreto de alta resistência, para as propriedade de retração e de desempenho mecânico. Os resultados permitiram aos autores concluir que o aumento no teor da fibra leva à uma redução da retração livre e da retração restringida, bem como, do potencial de fissuração e da temperatura de pico durante o processo de hidratação do cimento. Ainda, eleva a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade.

3.5 POLÍMEROS SUPERABSORVENTES COMO AGENTES DE CURA INTERNA

Atualmente no mercado, existe uma gama de polímeros para os mais diversos usos, sendo que 95% da produção mundial é destinada ao uso de absorventes higiênicos e fraldas descartáveis. Dentre eles, estão os polímeros superabsorventes (SAP), os quais fazem parte do grupo de materiais poliméricos sintéticos, e possuem elevada

capacidade de absorção de soluções líquidas (JENSEN; HANSEN, 2001). A introdução dos polímeros superabsorventes na construção civil, ocorreu através de Jensen e Hansen, que em 2001 avaliaram o potencial deste material no combate a retração autógena. Após a comprovação do seu potencial benéfico às matrizes cimentícias, muito tem se pesquisado e desenvolvido a cerca do polímero, seja como agente de cura interna, aditivos controlador da quantidades de água, agentes mitigadores da retração autógena, ou até no controle de efeitos de gelo/degelo (ESTEVES, 2011).

Os SAP's podem ser classificados como polieletrólitos reticulados, que ao entrarem em contato com a água ou soluções aquosas incham, resultando na formação de um hidrogel (ESTEVES, 2011). Este hidrogel possui a função de um reservatório interno, pois armazena uma certa quantidade de água em seu interior e a liberação ao longo do tempo para dar continuidade do processo de hidratação. Desta forma, é considerado um agente de cura, com capacidade de reduzir a retração (LIU *et al.*, 2017). Os SAP's podem apresentar uma absorção de água de até 5000 vezes o seu próprio peso. No entanto, em soluções salinas diluídas, tais como a urina, a capacidade de absorção dos produtos comerciais é de aproximadamente 50 g/g. A queda da absorção ocorre de forma semelhante quando exposto à soluções como a do cimento, devido a variação da alcalinidade e concretização de íons (BORGES, 2019).

Segundo Manzano (2016), o processo de absorção e dessorção do SAP ocorre devido aos diversos mecanismos de transporte de água, sendo eles a pressão osmótica, a interação eletrostática, a entropia, a ação capilar e a interação de Coulomb, que dependem intimamente da composição química do polímero. Durante o processo de absorção de um SAP com ligações cruzadas, as unidades iônicas dissociam-se e criam uma densidade de carga ao longo das cadeias, gerando repulsões eletrostáticas que expandem o gel e promovem o inchamento. Além disso, é produzida uma elevada concentração de íons no gel, o que causa uma pressão osmótica que irá ser reduzida pela a diluição da carga, isto é, pelo inchamento do gel.

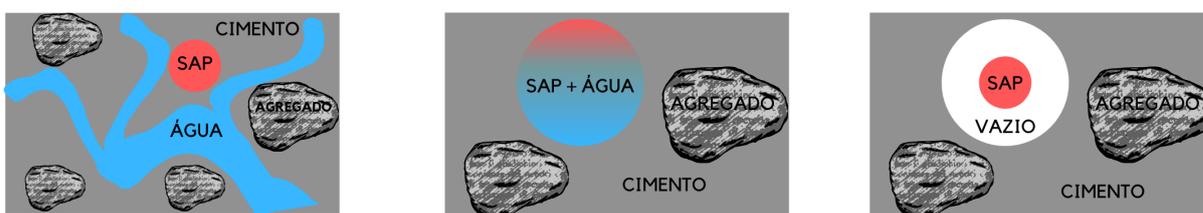
A capacidade de absorção, depende principalmente do grau de reticulação da rede do polímero, assim como a força e o módulo de elasticidade do gel dilatado (JENSEN; HANSEN, 2001). Além disso, o tamanho das partículas exerce influencia na capacidade de absorção, devido a granulometria estar diretamente ligada ao tempo necessário para saturação do polímero. Partículas muito grandes podem não chegar a saturação completa, devido ao tempo insuficiente para absorção durante a mistura, enquanto partículas muito pequenas podem apresentar menor absorção devido à superfície menos ativa (LYU *et al.*, 2020), contudo partículas maiores possuem maior capacidade de absorção devido ao maior reservatório.

Segundo Esteves (2010) as partículas com tamanho de 118 μm atingem o equilíbrio volumétrico em menos de 2 minutos, enquanto partículas com diâmetro de 125 μm apresentam equilíbrio somente depois de 5 minutos. Este tempo pode aumentar

até 20 minutos, se utilizado SAP com dimensão próxima a $300\ \mu\text{m}$. Além disso, SAP's com granulometrias muito finas, menores que $100\ \mu\text{m}$ podem gerar um bloqueio das próprias partículas frente à absorção. Ou seja, durante o início do processo de absorção, as partículas do polímero podem se aglomerar formando grânulos e impedir que grãos secos presos no interior do grânulo possam absorver água (MECHTCHERINE *et al.*, 2021).

Durante a dessorção, o fluxo ocorre de modo inverso, ou seja, do interior do SAP para o meio cimentício, o qual se encontra menos saturado que o interior do polímero devido ao consumo da água pelas reações de hidratação. Assim, o SAP inicia o processo de liberação gradual da água para a pasta cimentícia, causando assim redução do inchamento e diminuindo seu volume (JENSEN; HANSEN, 2001). No processo de dessorção são gerados vazios e consequentemente pontos fracos que reduzem a resistência mecânica da matriz, como mostra a Figura 14. Este efeito pode ser explicado pela modificação da microestrutura da pasta de cimento, onde após a liberação da água do SAP um vazio é deixado na matriz, o que aumenta a porosidade e diminui a resistência (MANZANO, 2016).

Figura 14 – Processo de absorção e dessorção do SAP



Fonte: Adaptado de Monnig (2009).

O polímero superabsorvente se comporta semelhantemente a um agregado poroso em meios cimentícios no estado fresco, ele atua absorvendo água da mistura. Contudo, é importante determinar a quantidade de líquido absorvido pelo SAP, para que a quantidade de água adicionada para a cura interna (a/ci) seja suficiente para saturar o polímero, evitando que haja perda da trabalhabilidade e que a água não seja inserida em demasia e acabe aumentando de forma desnecessária a relação a/c, o que tende a prejudicar o desempenho mecânico (MÖNNIG, 2009).

Contudo, a utilização do polímero superabsorvente na construção civil fica restrito a sua devida classificação. Devido ao grande número de polímeros existente no mercado, estes também apresentam diferentes taxas de absorção, dessorção e de porosidade, que é deixada após a hidratação do concreto. Se o material não for aplicado de maneira adequada, este pode interferir bruscamente na reologia do concreto e nas propriedades de atenuação da retração, estando estas capacidades diretamente dependentes da cinética do polímero e da sua devida classificação (ESTEVES, 2010).

Shen *et al.* (2016) estudaram diferentes adições de polímeros superabsorvente

em concretos de alto desempenho, neste estudo empregou-se um copolímero de acrilamida/ácido acrílico como material de cura interna. Foram estudadas 4 misturas, a primeira de referência sem adição de SAP, a segunda com 0,05% em peso de cimento, a terceira com 0,16% e a quarta com 0,26%. As misturas possuíam uma relação a/c de 0,33; 0,34; 0,36 e 0,38, respectivamente, sendo está variação correspondente a quantidade de água necessária para reação do SAP. Os resultados mostraram que, aos 28 dias, o concreto apresentou para os teores de 0,05%, 0,16% e 0,26% reduções de 15,1%, 41,5% e 56,0% na retração autógena quando comparados a amostra de referência e, ainda, revelou que mais de 70% do processo de retração ocorreu aos 14 dias, ou seja, o SAP tende a antecipar e intensificar o processo de hidratação do concreto. O estudo evidenciou que o SAP possui potencial de reduzir a retração autógena, assim como a resistência à compressão, contudo, os efeitos mitigadores da retração superam a queda na resistência e, portanto, seu uso é benéfico.

As características da retração, propriedades mecânicas, calor de hidratação e a estrutura de poros foram investigadas em misturas de argamassa auto-adensáveis por Yang *et al.* (2019b). Seu estudo consistiu em incrementar dosagens de 0%, 0,2%, 0,4% e 0,6% de SAP, com capacidade de absorção de 22 vezes, e realizar ensaios de resistência à compressão e a flexão, ensaios de retração por secagem e retração autógena e ensaios de caracterização. Os resultados mostraram que o SAP exerce grande influência na argamassa. Atua retardando o pico de liberação de calor e reduzindo sua intensidade, além disso, mostra-se eficiente para reduzir a retração por secagem e retração autógena. Os melhores resultados frente a retração foram encontrados para 0,4% de adição, entretanto, apesar do SAP diminuir a porosidade total, durante sua decomposição um grande vazio é deixado e assim as propriedades mecânicas são prejudicadas, sendo este comportamento proporcional as porcentagens de adições.

Yang *et al.* (2019a) analisaram a influência dos polímeros superabsorventes na mitigação da retração em pavimentos de concreto. O SAP utilizado trata-se de uma resina de poliacrilato de sódio com granulometria de 120-150 μm . Foram moldados amostras de referência sem a adição do polímero, com uma relação a/c de 0,37 e amostras contendo SAP com relação a/c de 0,42, está diferença na quantidade de água é em decorrência da cura interna. A partir do ensaio de retração restringida foi possível determinar que a amostra de referência apresentou aos 13,5 dias um valor de deformação por retração de $-78 \mu\epsilon$, enquanto a amostra com polímero apresentou aos 17 dias uma estabilização nas deformações com cerca de $-55 \mu\epsilon$. Além disso, o ensaio de retração livre em placas permitiu concluir que o polímero reduz as deformações causadas pela retração de secagem, uma vez que consome parte da água livre, levando a uma redução na fissuração de 20,61% nas bordas da placas. O SAP ainda retarda o aparecimento das fissuras. No trabalho, este processo teve início somente após 7 dias e permaneceu em crescimento até os 10 dias, desta forma fica comprovado o efeito de

cura interna promovido pelo polímero.

Os polímeros superabsorventes podem ter diferentes composições e serem originados de diferentes materiais, o que implica em diferentes propriedades. As propriedades variam em decorrência da composição, granulometria e taxa de absorção. Zhong *et al.* (2019) analisaram 8 composições com de 3 tipos de polímeros, sendo eles, o ácido acrílico, acrilamida e cloreto de metacrilamidopropiltrimetilamônio como monômeros principais. Como se tratava de combinações de materiais, os testes se concentraram na avaliação do SAP. Foram realizados testes de absorção, caracterização e do calor de hidratação, além de testes de resistência mecânica e de retração. O SAP com alta densidade de grupos aniônicos apresentou rápida absorção, seguida imediatamente de dessorção, enquanto, o SAP com baixa densidade de grupos aniônicos apresentou dessorção mais limitada. Os resultados mostraram que todos os SAP's foram eficientes para neutralizar a retração autógena e que a incorporação dos mesmos não exerceu efeito na resistência mecânicas das amostras.

Tan *et al.* (2020) assim como Zhong *et al.* (2019) investigaram a ação de diferentes tipos de polímeros superabsorventes, acrilato de sódio e ácido acrílico, com 5 granulometrias distintas para cada tipo de polímero. Seus esforços se concentraram em realizar testes de resistência mecânica e de microestrutura em argamassas contendo este material como agente de cura interna. Este estudo confirmou a mesma conclusão de diversos autores, que todos os SAP's são capazes de promover a hidratação e reduzir a retração dos compósitos. No entanto, em contrapartida a outros trabalhos, os resultados mostraram que ambos os SAP's apresentaram maior resistência à compressão aos 28 dias e maior microdureza, fato que pode ser explicado segundo os autores, pela continuidade do processo de hidratação.

Lyu *et al.* (2019) e Qin *et al.* (2020) avaliaram o comportamento do pavimento de concreto com adições de diferentes granulometrias de polímeros superabsorventes. O SAP utilizado foi o de poliácrlato de sódio nas malhas de 380 – 830 μm (SAP 1), 180 – 380 μm (SAP 2) e 120 - 150 μm (SAP 3). Ambos os pesquisadores realizaram testes de hidratação e movimentação de água dentro do concreto, além de testes de resistência mecânica, de retração e testes microestruturais. Lyu *et al.* (2019) relataram que todos os SAP's atingiram o equilíbrio hídrico após 30 min de contato com água, além disso, constataram que SAP's maiores absorvem mais água devido a sua massa original, prolongando assim, a taxa de umidade interna, entretanto, aumentam o diâmetro dos poros e conseqüentemente reduzem a resistência mecânica do compósito. Quanto a retração, os três distintos SAP's mostraram-se eficientes para mitigar este fenômeno, pois durante o processo de cura é produzido um gel de C-S-H e um líquido oriundo da reação entre o C_3A com SO_4^{2-} . Esses dois tipos de produtos de hidratação tornam a estrutura interna compacta e, assim, as fissuras primárias na interface são reduzidas, melhorando significativamente a resistência da ligação da zona de transição da interface.

Qin *et al.* (2020) confirma os resultados encontrados por Lyu *et al.* (2019), entretanto afirma que o SAP com menor granulometria possui uma maior capacidade de retenção de água, evitando que a água seja liberada antes das 10 h pós produção, contribuindo assim para uma melhor hidratação do compósito.

O efeito de polímeros superabsorventes em pavimentos de concreto foi investigado por Lyu *et al.* (2020). Nesta pesquisa o poliácrlato de sódio sintético foi utilizado como material de cura interna na dosagem de 0,9 kg/m³. Também foram estudados os efeitos da cura natural e da cura selada em amostras com e sem adição. Foram realizados ensaios de monitoramento da umidade, controle de retração e a estrutura de poros. Os resultados evidenciaram que temperaturas mais altas aumentam a absorção do SAP e a taxa de absorção e encurtam o tempo para atingir o equilíbrio de dilatação. Além disso, o SAP diminui a retração autógena e melhores resultados são obtidos para a cura selada. Quanto a estrutura de poros, observou-se que com a incorporação de SAP houve um aumento na porosidade do concreto, com diminuição no diâmetro médio dos poros e diminuição do diâmetro crítico. Portanto, é notável que o SAP aumenta os produtos de hidratação, promovendo a cura interna e refinando a estrutura de poros.

Baloch *et al.* (2019) acrescentaram polímeros superabsorventes e nanosílica em pastas de cimento autoadensável com o intuito de avaliar o desempenho individual e em conjunto dos materiais. Na sua pesquisa adicionaram 0,49% de SAP e porcentagem de 0, 1, 2 e 3% de nanosílica. Para realizar a análise os corpos de prova, foram ensaiados quanto as propriedades no estado fresco, a retração precoce, resistência à compressão e quanto a microestrutura e morfologia. A adição de nanosílica melhorou as propriedades mecânicas em todas as situações, com melhores resultados para 2% de adição em amostras com SAP e 1% para amostras convencionais. Quanto ao SAP, este se mostrou eficaz para mitigar a retração em todas as misturas.

No Brasil uma série de pesquisas vem sendo realizadas pela Universidade de Brasília desde 2013, em sua grande maioria utilizando o polímero desenvolvido na Universidade Técnica da Dinamarca pelo Professor Ole Mejlhede Jensen, pioneiro no uso do SAP em matrizes cimentícias. Os trabalhos incluem dissertações de mestrado (ORDÓÑEZ, 2013; SUAREZ, 2015; COUTO, 2016; SANTOS, 2016; AGOSTINHO, 2017) e teses de doutorado (MANZANO, 2016; SILVA JÚNIOR, 2017). Apesar dos autores utilizarem diferentes adições e realizarem diferentes estudos, todos concordam que o SAP possui elevada capacidade de reduzir a retração, ao promover a cura interna e melhorar a hidratação do cimento. E ainda, concordam que o aumento da porosidade ocasionado pela dessorção do SAP, gera vazios na matriz e, conseqüentemente, pontos fracos que prejudicam as propriedades mecânicas do compósito.

3.5.1 CARACTERIZAÇÃO DO POLÍMERO

Diversas são as propriedades físicas, químicas e morfológicas que podem ser avaliadas através de ensaios, no entanto, algumas propriedades apresentam maior relevância quando o polímero é inserido no meio cimentício. De acordo com Assmann (2013), as propriedades mais influentes são: a capacidade de absorção e a distribuição do tamanho das partículas secas e saturadas, após a absorção. Estas propriedades por possuírem forte influência na capacidade de absorção, dessorção e na porosidade do matriz, devem ser analisadas no intuito de melhor entender o comportamento e a influência destes nos sistemas à base de cimento.

3.5.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Dentre todas as características físicas, pode-se citar como as principais o formato, granulometria e distribuição das partículas. O desempenho do concreto pode ser afetado pelo tamanho das partículas do SAP, uma vez que afeta a estabilidade mecânica durante o processo de mistura e influencia na reologia do concreto fresco (ANDRADE NETO, 2014). No que diz respeito à capacidade de mitigar a retração, a dimensão das partículas do SAP é também de fundamental importância, uma vez que partículas com tamanho de 100 μm apresentam uma capacidade de absorção e dessorção adequada (ASSMANN, 2013).

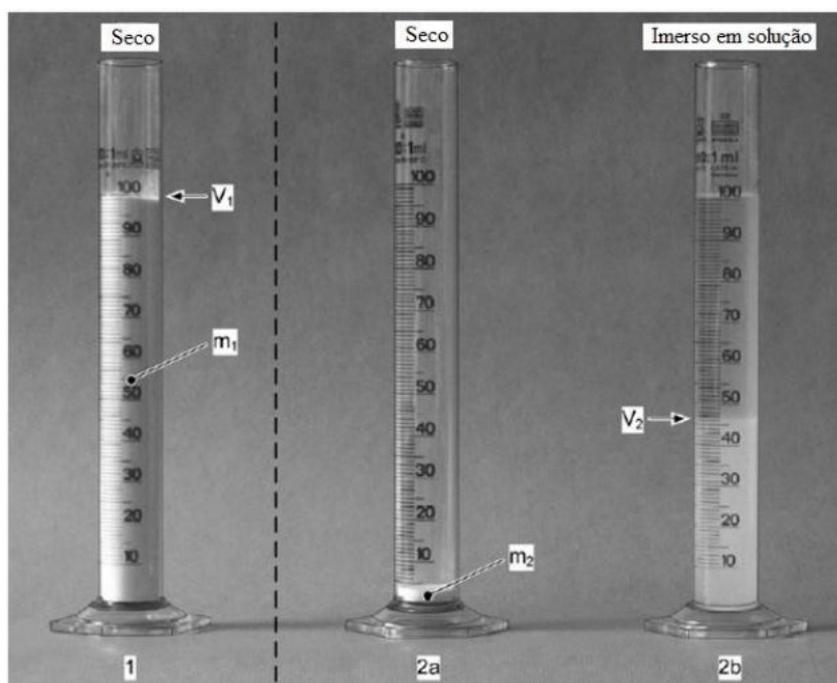
3.5.1.2 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO LIVRE

A capacidade de absorção livre do polímero pode ser realizado por diversos métodos, dentre os mais utilizados destacam-se *tea bag* e método dos cilindros graduados. Este ensaio permite analisar a absorção dos polímeros quando colocados em contato com água ou imersos nela. A capacidade de absorção baseia-se na relação de equilíbrio entre a massa do meio absorvido e a massa inicial do polímero seco (COUTO, 2016).

O método do *tea bag*, também conhecido como método do saquinho de chá, trata-se de um ensaio simples, que apesar de não normatizado, é bastante utilizado para a determinação da absorção do polímero. O ensaio consiste em colocar uma quantidade conhecida de SAP em uma embalagem lacrada, porém permeável, que permita ao polímero absorver água o fluido através da embalagem. Após o polímero estar saturado, o conjunto é retirado e suspenso para remover o excesso de líquido e, em seguida, pesado. Assim, se obtém a capacidade de absorção comparando a massa do saquinho após a imersão e a massa do polímero seco (COUTO, 2016). Jensen (2011), afirma que este ensaio não é representativo para determinar a absorção quando o polímero está imerso em meio cimentício.

O método dos cilindros graduados foi desenvolvido por Jensen (2011) e também pode ser aplicado em meios cimentícios. Por ser de simples execução, é comumente realizado na indústria para estimar a capacidade de absorção de água do SAP. A metodologia consiste em determinar o aumento do volume do SAP à medida que ocorre a absorção, sendo possível, neste ensaio, medir o estado de equilíbrio para absorção de água, podendo ainda, com absorção lenta, medir alguns pontos de desenvolvimento no tempo. O ensaio se dá primeiramente, pela relação entre o volume e a massa do SAP seco. Para isto, preenche-se completamente o cilindro graduado, com SAP seco, e determina-se a massa de SAP (m_1), assim como o volume (V_1), que é dado pela máxima leitura do cilindro realizada com as partículas de SAP soltas. Na sequência, uma pequena amostra do polímero, com massa conhecida (m_2), é colocada em contato com a solução aquosa dentro do cilindro e após a completa saturação, o volume (V_2) é determinado. A Figura 15 ilustra o procedimento realizado para esse ensaio.

Figura 15 – Determinação da capacidade de absorção de água por cilindros graduados. 1: a relação entre volume e massa das partículas de SAP seco é medida. 2a: uma certa quantidade pequena de SAP seco é colocada em um cilindro graduado. 2b: o cilindro graduado preenchido com o fluido de interesse



Fonte: Assmann, (2013).

A partir das leituras e conhecendo as densidades do polímero seco (ρ_{sap}) e da água ($\rho_{\text{água}}$), é possível calcular a capacidade de absorção (k) com a Equação 3.1 (JENSEN, 2011). Esse método assume algumas simplificações, tais como: (a) assumir que a densidade de assentamento do SAP seco é a mesma do inchado e (b) assumir que o volume inicial do SAP, somado ao volume de água antes da absorção pelo polímero, é equivalente ao volume do SAP inchado. Mesmo sem a devida comprovação

das simplificações, este método tem se mostrado satisfatório para estimar a absorção.

$$k = \frac{\rho_{\text{água}}}{\rho_{\text{sap}}} * \left(\frac{V_2}{V_1} * \frac{m_1}{m_2} - 1 \right) \quad (3.1)$$

3.5.1.3 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO EM MEIO CIMENTÍCIO

O percentual de adição de SAP, assim como a quantidade de água extra, dependem intimamente da capacidade de absorção do mesmo no meio em que será inserido. Para a caracterização em meio cimentício foi utilizado o método da mesa de espalhamento ou *slump-flow* de argamassas adaptado por Monning (2009), sendo esta metodologia de fácil execução e que utiliza equipamentos facilmente encontrados em laboratórios de ensaio de materiais cimentícios.

O método da mesa de espalhamento consiste em comparar o espalhamento de uma argamassa contendo uma quantidade pré-determinada de SAP com o espalhamento de argamassas de referência sem o polímero, com diferentes relações a/c. A capacidade de absorção é determinada assumindo-se que a água absorvida pelo SAP não contribui para o espalhamento. Então considera-se que a quantidade de água não absorvida pelo SAP é igual a quantidade de água adicionada a argamassa de referência que apresenta a curva de espalhamento mais similar ao traço com SAP (COUTO, 2016; SUAREZ, 2015).

O procedimento de mistura para a produção das argamassas deve seguir as recomendações do comitê técnico da RILEM TC 225-SAP. A ordem e o procedimento de mistura recomendado por este comitê é apresentada na Tabela 2. Após a produção, a argamassa deve ser ensaiada seguindo as recomendações da norma DIN EN 18555-2 (1982), porém sem a execução de golpes. O tronco de cone deverá ser preenchido em duas camadas com a aplicação de dez golpes em cada camada. Após o espalhamento deverá ser realizado o aferimento do diâmetro da argamassa, com no mínimo duas medidas. As medições deverão ser realizadas em curtos intervalos de tempo, cerca de 5 min, e deverão permanecer durante um período de tempo que permita ao SAP obter sua saturação completa.

Tabela 2 – Procedimento de mistura para preparo das argamassas para o ensaio de mesa de espalhamento

Tempo (min)	Descrição atividade	Duração (min)
-	Mistura dos agregados secos, incluindo o SAP	4:00
0:00 - 1:00	Adição de água, juntamente com o aditivo	1:00
1:00 - 4:00	Mistura inicial	3:00
4:00 - 5:00	Raspagem das laterais do misturador	1:00
5:00 - variável	Mistura final	-

Fonte: Adaptado de Andrade, (2014).

A água absorvida pelo SAP é então encontrada pela diferença entre o total de água adicionada no traço com SAP e a quantidade considerada como não absorvida. A capacidade de absorção (AC), de água do polímero superabsorvente pode então ser calculada pela Equação 3.2.

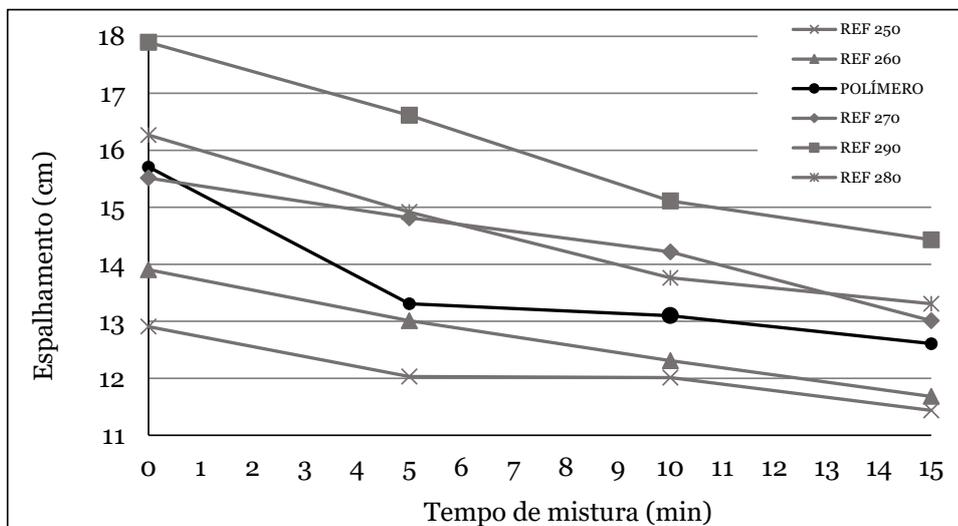
$$AC = \frac{m_{\text{água}} - m_{\text{dispon}}}{m_{\text{sap}}} \quad (3.2)$$

Na qual, AC é a absorção da água por g de polímero, $m_{\text{água}}$ é a massa de água total da mistura com inclusão de polímero, m_{sap} é de SAP e m_{dispon} é o conteúdo de água presente na argamassa de referência que apresentou o espalhamento mais próximo da mistura com polímero.

A absorção do polímero varia de acordo com as propriedades do meio aquoso em que está inserido, portanto, para que este ensaio seja mais preciso é importante que a argamassa simule de forma realista as propriedades desse meio. Além disso, o teor de água adicionado em cada traço é determinado em laboratório, baseado no traço adotado e no espalhamento que se deseja, podendo variar de autor para autor. O teor de polímero e de água extra pode ser determinado baseando-se em trabalhos anteriores, quando estes existem, ou pode ser determinado por tentativa e erro em laboratório, quando se busca uma curva de espalhamento semelhante as argamassas sem polímero.

Um exemplo de aplicação deste método pode ser observado na Figura 16, na qual são apresentados os resultados obtidos por Mönning (2009). Em seu estudo, o autor produziu seis amostras de uma argamassa, que apresentava propriedades semelhantes ao seu composto final, contendo diferentes teores de água, que variaram de 250 a 290 ml, com adição de 10 ml a cada novo traço (representadas na cor cinza). Dentre elas, a amostra representada pela cor preta continha uma quantidade de 0,6 g de SAP e uma quantidade de 297 ml de água, teores estes determinados por tentativa e erro. Pela análise dos resultados, o autor concluiu que a argamassa contendo 270 ml de água é que mais se aproxima da argamassa com SAP, principalmente no tempo máximo de observação, no qual o SAP já está completamente saturado. O autor obteve a partir da Equação 3.2, a absorção de 45 ml/g para o polímero estudado.

Figura 16 – Determinação de espalhamento da argamassa de referência e da argamassa com polímero



Fonte: Adaptada de Mönning, (2005).

3.5.2 MODELO DE POWERS E O TEOR DE ÁGUA PARA CURA INTERNA

O uso de polímeros superabsorventes como agente de cura interna para materiais à base de cimento Portland foi apresentado por Jensen e Hansen (JENSEN; HANSEN, 2001). Os autores formularam uma reinterpretação do modelo de Powers, desenvolvido por Powers e Brownyard em 1948, para explicar o fenômeno da retração e os fundamentos da incorporação de água para cura interna (ASSMANN, 2013).

A adaptação do modelo de Powers pode ser observada na Figura 17, na qual se apresenta a distribuição volumétrica de fases em função do grau de hidratação, na condição selada, para uma pasta de cimento com a/c de 0,36 em comparação com uma pasta de cimento com água de cura interna com a/c de 0,42 (0,36 + 0,06). Na figura da direita, a parte adicional da designação, refere-se à quantidade de água incorporada, $(a/c)_e$ de 0,06. A hidratação da pasta com baixa relação a/c é cessada quando a água capilar é consumida na sua totalidade, enquanto, a hidratação do sistema de pasta com polímero superabsorvente, têm seu processo continuado com água de cura interna. No caso da relação $a/c = 0,36 + 0,06$, a hidratação máxima é alcançada, onde $\alpha_{max} = 1$ (ASSMANN, 2013). A construção dos gráficos da Figura 17 se deu a partir das equações propostas por Powers e Brownyard em 1948 (SILVA JÚNIOR, 2017), que são apresentadas abaixo:

$$\text{Volume de sólidos de gel} \quad V_{sg} = 1,52 * (1 - p) * \alpha \quad (3.3)$$

$$\text{Volume de água de gel} \quad V_{ag} = 0,60 * (1 - p) * \alpha \quad (3.4)$$

$$\text{Volume de cimento anidro } V_{ca} = (1 - p) * (1 - \alpha) \quad (3.5)$$

$$\text{Volume de retração química } V_{rq} = 0,20 * (1 - p) * \alpha \quad (3.6)$$

$$\text{Volume de água capilar } V_{ac} = p - 1,32 * (1 - p) * \alpha \quad (3.7)$$

$$\text{Porosidade inicial } p = \frac{a/c}{a/c + \rho_a/\rho_c} \quad (3.8)$$

Onde,

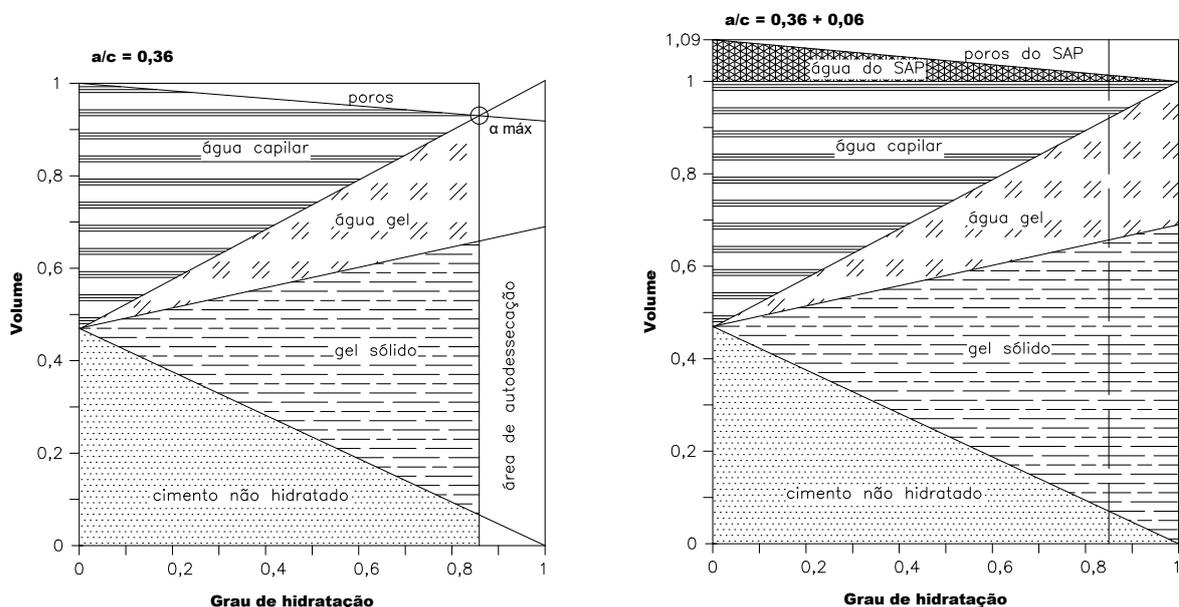
a/c= relação água/cimento;

α = grau máximo de hidratação do cimento (kg de cimento hidratado/ kg de cimento anidro);

ρ_c = 3150 kg/m³ (massa específica do cimento);

ρ_a = 1000 kg/m³ (massa específica da água).

Figura 17 – Distribuição volumétrica da fase de pastas de cimento em função do grau de hidratação para relações a/c de 0,36 (esquerda) e 0,42 (direita)



Fonte: Assmann, (2013).

Matrizes cimentícias com elevadas relações a/c tendem a apresentar baixas propriedades mecânicas, devido ao maior número de poros, neste caso, a água de cura interna deve ser adicionada apenas na quantidade para saturar o polímero e impedir a autodessecação. Baseado no modelo Powers, é possível estimar a quantidade de água incorporada baseada na taxa de autodessecação (JENSEN; HANSEN, 2001).

Presume-se a partir deste modelo, que o grau máximo de hidratação é alcançado quando todo o espaço é ocupado pelos volumes de gel, sendo eles o V_{sg} do gel sólido, V_{ag} de água gel e V_{ca} de cimento não hidratado. Neste caso temos:

$$V_{sg} + V_{ag} + V_{ca} = 1,0 \text{ para } \alpha = \alpha_{\text{máx}} \quad (3.9)$$

$$1,52 * (1 - p) * \alpha_{\text{máx}} + 0,60 * (1 - p) * \alpha_{\text{máx}} + (1 - p) * (1 - \alpha_{\text{máx}}) = 1 \quad (3.10)$$

Como resultado, a quantidade de água para cura interna é igual a retração química da pasta de cimento no grau máximo de hidratação. A condição necessária para obter α máx é:

$$(a/c)_e = 0,18 * (a/c) \text{ para } (a/c) < 0,36 \quad (3.11)$$

$$(a/c)_e = 0,42 - (a/c) \text{ para } 0,36 \leq (a/c) \leq 0,42 \quad (3.12)$$

Com base na quantidade de água necessária para combater a retração química do cimento, é possível determinar a quantidade de polímero que precisa ser incorporada. Neste cálculo leva-se em consideração a absorção do SAP em meio cimentício (AC) (ZHONG *et al.*, 2019). A Equação 3.13 determina a quantidade de SAP.

$$SAP/c = \frac{(a/c)_e}{AC} \quad (3.13)$$

3.6 USO DE FIBRAS DE POLIPROPILENO E POLÍMERO SUPERABSORVENTE

O polímero superabsorvente, como já mencionado anteriormente, após sofrer o processo de dessecamento deixa vazios na estrutura, o que tende a reduzir a resistência mecânica. Pesquisadores desta área vem buscando alternativas para contornar este problema, tais como o uso combinado do SAP com fibras, que são inseridas na matriz no intuito de manter as propriedades mecânicas do compósito original e, principalmente, fornecer maior ductilidade para a matriz.

Olivier *et al.* (2018) utilizaram nanosílica e polímeros superabsorventes, entretanto, eles adicionaram mais um material, a microfibras de polipropileno ($df=50 \mu\text{m}$ $lf=12 \text{ mm}$), e avaliaram o efeito individual e das diversas combinações dos materiais. As dosagens consistiram em adicionar 625 ml para 100 kg de cimento de uma solução de nanosílica coloidal, 0,3% de polímeros superabsorventes em relação ao peso de aglutinante e 0,9 kg/m³ de microfibras de polipropileno e foram avaliadas quanto a resistência mecânica, retração e assentamento plástico e quanto as propriedades microestruturais. Seus resultados revelaram que a nanosílica reduz o tempo de secagem e a taxa de

exsudação, e como consequência ocorre menor retração plástica, esta redução foi de aproximadamente 10% para as amostras contendo fibras, sendo mais pronunciado nas amostras contendo SAP, onde a redução foi de 25%. O efeito combinado da fibra e do polímero não evidenciou melhoria na retração e na resistência mecânica, quanto comparadas ao seu efeito isolado.

Shen *et al.* (2019a) analisaram em seus estudos, o efeito da variação do comprimento da fibra Barchip no comportamento de concretos de alto desempenho curados internamente com SAP. O comprimento variou em 42 mm, 54 mm e 60 mm, sendo adicionados no percentual de 8 kg/m³, enquanto o SAP foi adicionado no teor de 2,99 kg/m³. Os resultados revelaram que a resistência à tração e à compressão aumentaram com a aplicação das fibras Barchip, sendo proporcional ao aumento do comprimento da fibra, além disso, o uso de SAPs reduziu o retração autógena, a taxa de tensão de tração restrita, o comportamento de fluência de tração e o pico de temperatura durante a hidratação e ainda elevou a resistência à fissuração. Com o uso combinado de ambos os métodos, a medida que o comprimento da fibra aumentou, houve também um aumento na fissuração total, contudo houve redução na retração autógena e na temperatura de pico de hidratação. Este aumento se deve a fraca dispersão das fibras Barchip principalmente as de 60 mm de comprimento.

Shen *et al.* (2020) também avaliaram a influência do uso de fibras de PP e do SAP quanto a tensão residual e o potencial de fissuração. Neste estudo, as fibras do tipo Barchip foram empregadas em teores de 2,76 kg/m³, 5,52 kg/m³ e 8,28 kg/m³, juntamente com 2,92 kg/m³ de SAP e as amostras foram avaliadas quanto as propriedades mecânicas e de retração. Os autores concluíram que ao elevar o teor de fibra houve uma redução na retração livre, na retração restringida e no potencial de fissuração, quanto ao tempo de início da fissuração, este elevou-se com o aumento do teor da fibra. Já a tensão residual diminuiu com o aumento do conteúdo de fibras. Segundo os autores, o SAP utilizado como CI melhoraram significativamente o desempenho do concreto reforçado com fibras Barchip.

Os mesmos autores, Shen *et al.* (2020c), avaliaram ainda a relação entre a retração autógena precoce e a velocidade ultrassônica. As fibras Barchip utilizadas possuíam superfície rugosa, com teor variando de 2,76 kg/m³, 5,52 kg/m³ e 8,28 kg/m³, enquanto o SAP foi adicionado no teor de 2,92 kg/m³. Os resultados indicaram que retração autógena e a velocidade ultrassônica do concreto diminuíram com o aumento da porcentagem de volume da fibra Barchip e diminuíram com a adição de SAP e, ainda, segundo eles, embora a adição de SAP enfraqueça as propriedades mecânicas nas primeiras idades, seu efeito de reduzir de redução da retração se mostra sobressai sobre os demais efeitos.

Fan *et al.* (2020) partiram para uma linha diferente e analisaram a influência do polímero superabsorvente em um composto híbrido fibroso, contendo fibras de basalto

e fibras de polipropileno. O SAP utilizado era uma resina absorvente de policarboxilato com capacidade de absorção de 22 vezes e a incorporação ocorreu no teor de 0,15%, enquanto as fibras foram adicionadas em proporções de 4 partes de fibra de basalto para 1 parte de fibras de polipropileno. Após os ensaios mecânicos e de retração, foi possível concluir que o SAP leva a uma queda na resistência à compressão e flexão, contudo essa queda pode ser compensada pelo uso da hibridização. Além disso, os ensaios de fratura revelaram que a combinação da hibridização com o polímero elevou significativamente os resultados, o que ocorreu de forma semelhante frente a retração, onde a combinação dos métodos resultou em uma queda na deformação por retração e nas dimensões das fissuras. De forma resumida, o SAP reduziu o fenômeno da retração, enquanto a hibridização conservou as propriedades mecânicas.

Em geral, alguns pesquisadores vêm realizando trabalhos aprofundados sobre o concreto modificado SAP e do concreto reforçado com fibra, no entanto, na sua maioria os estudos focados na influência destes materiais adicionados separadamente, não havendo, portanto, um conhecimento sólido do uso combinado destes materiais. Carecendo também, estudos sobre o efeito comparativo entre diferentes fibras e a sua influência nas propriedades do concreto. Neste sentido, este trabalho pretende avaliar de maneira comparativa os efeitos da macrofibra Barchip e da macrofibra Tegra frente as propriedades de retração e propriedades mecânicas quando submetidas a um agente de cura interna (SAP).

3.7 SÍNTESE DOS TRABALHOS RELACIONADOS

A Tabela 3, a Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os trabalhos relacionados aos materiais a serem empregados nesta pesquisa e suas principais contribuições na mitigação da retração e no desempenho mecânico. Os trabalhos apresentados nas tabelas já foram mencionados na forma de texto em itens anteriores.

Tabela 3 – Trabalhos relacionados a estudos contendo apenas fibras PP

Ano	Autor	Parâmetro estudado	Contribuição
2006	Banthia, N.; Gupta, R.	Fibras PP (monofilamento e fibrilar) (0,1% 0,2% e 0,3%)	Todas as fibras PP estudadas possuem potencial para reduzir a retração e o teor de fibra é proporcional ao seu desempenho. Quanto maior o comprimento e menor diâmetro da fibra mais eficaz ela é na mitigação da retração.
2018	Gong, J.;	Fibras PP ($df=0,018-0,045$ mm e $lf=19$ mm) Agente redutor da retração	Aumento no teor do agente redutor, aumento da microexpansão inicial. O aumento no teor de fibras levou a redução da retração plástica e da retração por secagem. Melhores resultados de mitigação da retração foram encontrados para a amostra com 3% de agente redutor e 0,3% de fibras PP.
2018	Shen D. <i>et al.</i>	Fibra Barchip (4; 8 e 12 kg/m ³)	Aumento no teor de fibra elevou a resistência mecânica, reduziu a retração livre e a restringida e, ainda, reduziu o potencial de fissuração. 8 kg/m ³ é o melhor teor de adição, principalmente frente a retração.
2020	Cao Q. <i>et al.</i>	Fibras PP retas ($df=0,07$ mm e $lf=19$ mm) Agentes expansivos Agregados leves saturados	As fibras PP apresentaram melhores resultados na mitigação da retração quando comparadas de forma isolada com os demais materiais. No entanto, o uso combinado dos materiais, seja da fibra com o agente ou da fibra com agregados leves, apresentou melhores resultados na redução da largura, comprimento e na área de fissuras.
2020	Mohammadhosseini, H. <i>et al.</i>	Fibras PP ($df=0,45$ mm e $lf=20$ mm) Cinza de óleo de palma	Redução de 23% na retração por secagem com 0,75% de fibras PP e 0,20% de cinza. O aumento no teor de fibras diminui a resistência à compressão, porém eleva a resistência à tração.
2020	Shen D. <i>et al.</i>	Macrofibras PP (42, 54 e 60 mm)	Maior comprimento da fibra, menor taxa de liberação de calor durante a hidratação e menor taxa de retração autógena, porém menor resistência à fissuração. Fibras mais longas melhoram o desempenho mecânico.
2020a 2020b	Shen D. <i>et al.</i>	Fibra Barchip (2,76; 5,52 e 8,28 kg/m ³)	Aumento no teor de fibra reduziu a retração livre, a retração restringida, o potencial de fissuração e a curva de liberação de calor. Uma maior quantidade fibra eleva a resistência à tração, à compressão e o módulo de elasticidade.

Fonte: Elaboração própria, (2021).

Tabela 4 – Trabalhos relacionados a estudos contendo apenas SAP

Ano	Autor	Parâmetro estudado	Contribuição
2016	Shen <i>et al.</i>	SAP Teores de 0%, 0,05%, 0,16% e 0,26%	O SAP reduziu a retração em 15,1%, 41,5% e 56,0% para os teores 0,05%, 0,16% e 0,26% respectivamente, e ainda antecipou o processo de cura. No entanto, reduziu a resistência à compressão.
2019	Yang <i>et al.</i>	SAP Teores de e 0%, 0,2%, 0,4% e 0,6%	SAP reduziu a retração por secagem e autógena. Ainda retardou o pico de liberação de calor e reduziu sua intensidade, os melhores resultados foram obtidos para o teor de 0,4%. Porém, o uso do SAP reduziu as propriedades mecânicas.
2019b	Yang <i>et al.</i>	Amostra com SAP Amostra sem SAP	O polímero reduziu a retração autógena e a retração por secagem e ainda retardou o surgimento das fissuras.
2019	Zhong <i>et al.</i>	SAP Diferentes composições	Todos os SAP's são capazes de neutralizar a retração, no entanto, os polímero com alta densidade de grupos aniônicos possuem melhores propriedades de absorção e dessorção. O polímero não influenciou as propriedades mecânicas.
2019 2020	Lyu <i>et al.</i> Qin <i>et al.</i>	SAP Diferentes granulometrias	O SAP com maior granulometria absorve mais água e prolonga a taxa de umidade interna, no entanto, deixam poros grandes que reduzem a resistência mecânica. Enquanto menores granulometrias apresentam melhores taxas de retenção de água.
2020	Tan <i>et al.</i>	SAP (acrilato de sódio e ácido acrílico) Diferentes granulometrias	Todos os SAP's são capazes de promover a hidratação e reduzir a retração dos compósitos. Amostras com SAP apresentaram maior resistência à compressão aos 28 dias.
2020	Lyu <i>et al.</i>	SAP Cura selada e cura natural	O SAP reduziu a retração autógena principalmente para a cura selada, porém elevou a porosidade do compósito.

Fonte: Elaboração própria, (2021).

Tabela 5 – Trabalhos relacionados a estudos contendo SAP e fibras PP

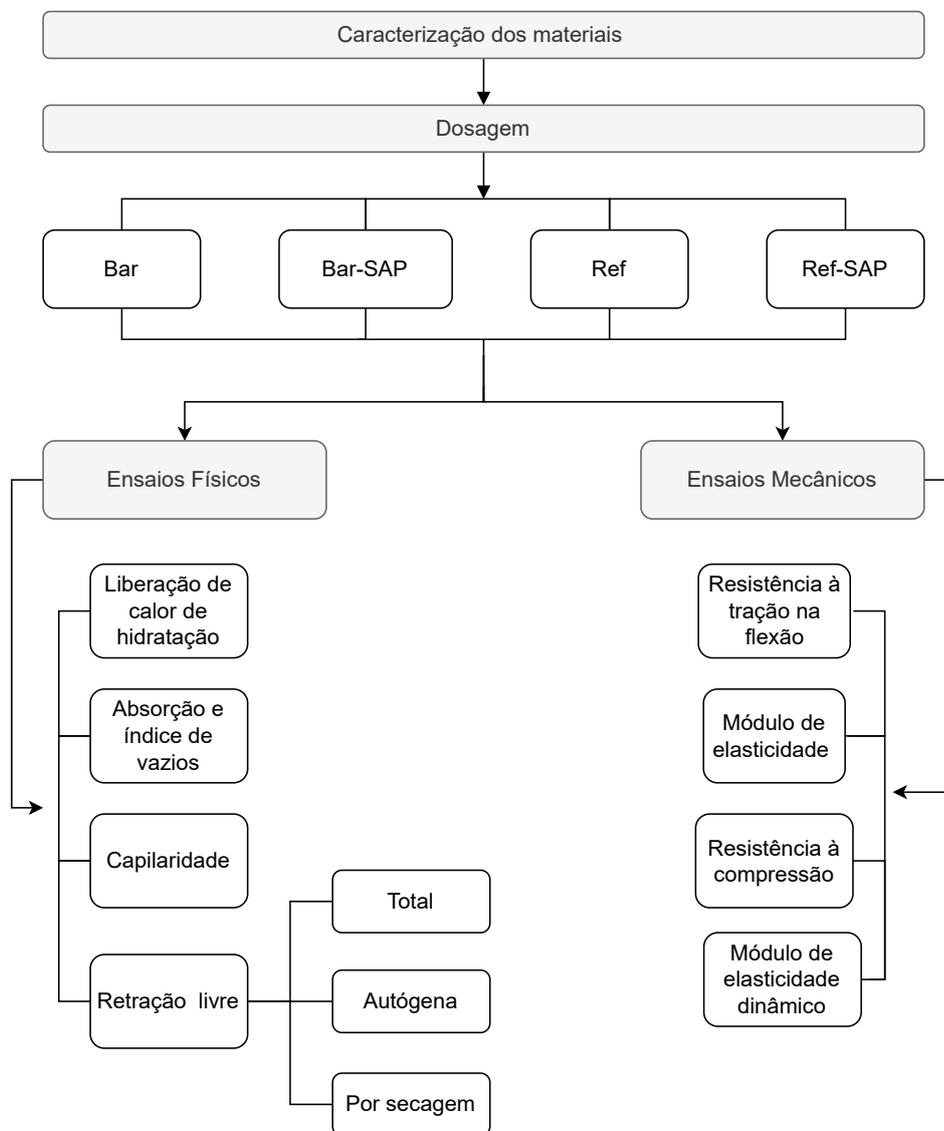
Ano	Autor	Parâmetro estudado	Contribuição
2018	Olivier <i>et al.</i>	Microfibras PP ($df= 50 \mu\text{m}$ e $lf=12 \text{ mm}$) Nanosílica 0,3% SAP	O uso combinado da nanosílica com a microfibra reduziu a retração em 10%, enquanto o uso de nanosílica mais SAP reduziu em 25%. O uso do SAP mais a microfibra não exerceu influência significativa na resistência mecânica e na retração, quando comparado ao uso individual.
2019b	Shen <i>et al.</i>	Fibras Barchip ($lf= 42, 54$ e 60 mm) SAP	O aumento no comprimento da fibra elevou o desempenho mecânico. O SAP se mostrou eficaz no combate a retração. O uso combinado dos métodos se mostrou eficaz para reduzir a retração, no entanto, o aumento do comprimento da fibra levou a uma maior taxa de fissuração.
2020	Shen <i>et al.</i>	Fibras Barchip ($2,76; 5,52$ e $8,28 \text{ kg/m}^3$) SAP	O aumento do teor de fibra combinado com o uso do SAP reduz a retração livre, retração restringida e o potencial de fissuração. No entanto, a maior porcentagem de fibra reduz a tensão residual.
2020d	Shen <i>et al.</i>	Fibras Barchip ($2,76; 5,52$ e $8,28 \text{ kg/m}^3$) SAP	A retração autógena e a porosidade são reduzidas com o incremento no teor de fibras, assim no incremento do SAP. O SAP prejudica as propriedades mecânicas.
2020	Fan <i>et al.</i>	Fibras de basalto e PP SAP	O SAP reduz o desempenho mecânico, no entanto a hibridização compensa essa redução. O uso combinado dos materiais mostrou-se eficaz para reduzir a retração e as dimensões das fissuras.

Fonte: Elaboração própria, (2021).

4 METODOLOGIA

De acordo com os objetivos propostos neste trabalho, desenvolveu-se um programa experimental que possibilitasse a análise comparativa do efeito da macrofibra PP e do agente de cura interna na mitigação da retração em matrizes cimentícias, considerando os efeitos nas propriedades mecânicas. Este capítulo aborda, portanto, o programa experimental estabelecido, expondo os materiais, equipamentos, procedimentos e normas adotadas. Na Figura 18 é apresentado um organograma que ilustra de forma simplificada o procedimento experimental estabelecido para esta pesquisa.

Figura 18 – Programa experimental



Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.1 MATERIAIS EMPREGADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados nesta pesquisa. Os materiais básicos utilizados nas misturas de concreto incluem cimento Portland de alta resistência inicial, agregado graúdo de origem basáltica, agregado miúdo originário da sílica, aditivo superplastificante e água. Os materiais alternativos compreendem as macrofibras do tipo Barchip e o polímero superabsorvente. As fibras são inseridas no concreto com o intuito principal de compensar a perda da resistência mecânica provocada pelos vazios deixados pelo SAP, no entanto, sabe-se que este tipo de fibra em específico, pode também, contribuir para a redução da retração, uma vez que possuem a capacidade de transferir esforços e de costurar fissuras. Desta forma, as fibras atuam frente às duas linhas desta pesquisa, a retração e a conservação das propriedades mecânicas, enquanto o polímero superabsorvente atua promovendo a cura interna e assim reduzindo a retração nas primeiras idades.

4.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado nesta pesquisa é o cimento com alta resistência inicial, conhecido como comercialmente como CP V-ARI da fabricante Votorantim Cimentos. Sua composição é formada por 90 a 100% de clínquer e gesso e 0 a 10% de filler calcário.

Optou-se pelo uso deste tipo de cimento devido ao traço se basear em uma mistura para pavimentos de concreto, onde normalmente se emprega este tipo de cimento devido a necessidade de rápida execução das obras e de alta resistência mecânica. A elevada finura deste cimento combinada com a grande quantidade de materiais pozolânicos, promove altas taxas de temperaturas durante hidratação, o que acaba por elevar a autodessecação e conseqüentemente à retração.

4.1.2 AGREGADO GRAÚDO

Para produção do concreto utilizou-se o agregado graúdo de origem basáltica, fornecido pela pedreira Pedra Rosada, localizada no município de Alegrete-RS. Para caracterizar este material foi realizado o ensaio de granulometria, massa específica e absorção de água, além do ensaio de massa unitária e índice de vazios. As características granulométricas foram determinadas de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), enquanto as físicas foram determinadas pela NBR 16917 (ABNT, 2021a) e NBR 16972 (ABNT, 2021c) respectivamente. A Figura 19 apresenta o aspecto visual do agregado graúdo a ser utilizado.

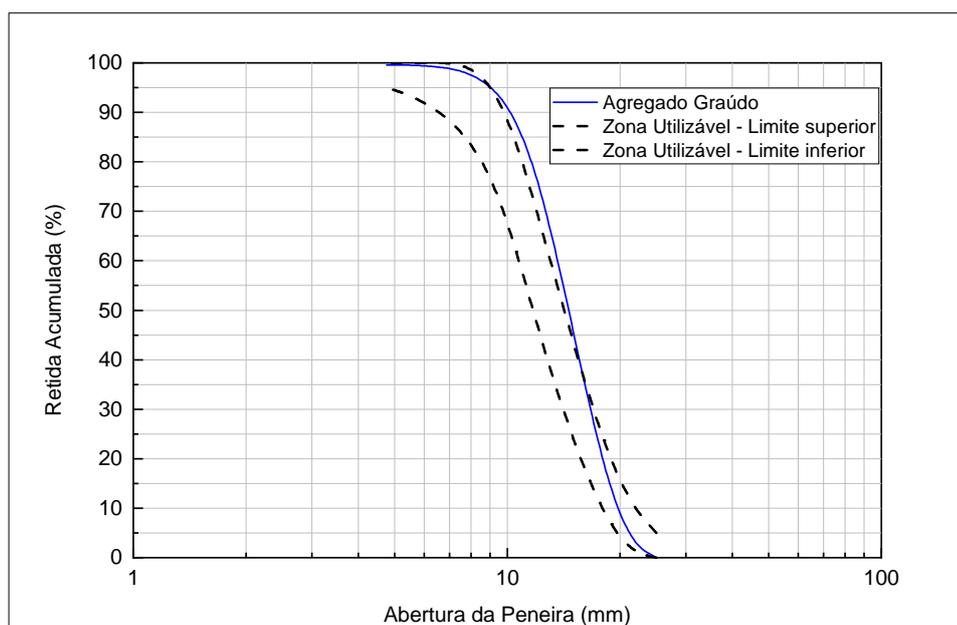
Figura 19 – Aspecto visual do agregado graúdo



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Na Figura 20 é apresentada a curva granulométrica da brita, considerando os limites estabelecidos pela norma NBR 7211 (ABNT, 2005a) na faixa 9,5/25 mm. Os resultados quanto as propriedades físicas indicam que o agregado apresenta uma massa unitária de $1,42 \text{ g/cm}^3$ e um índice de vazios de 48%, quanto a densidade, na condição seca foi encontrado o valor de $2,74 \text{ g/cm}^3$ e na condição saturada de $2,79 \text{ g/cm}^3$, o que resultou em absorção de água de 1,76%. A dimensão máxima característica do agregado foi determinada em 19 mm, o que o caracteriza como brita 1.

Figura 20 – Granulometria da brita

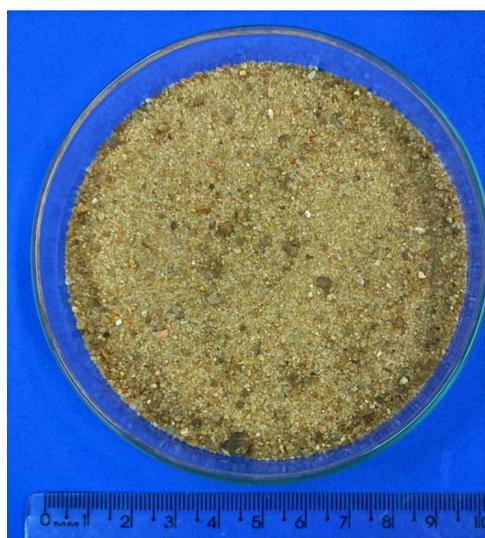


Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.1.3 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado trata-se de uma areia natural proveniente do município de Alegrete-RS. No intuito de caracterizar este material, foram realizados os ensaios: de granulometria, normatizada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) e os ensaios de massa específica e absorção, regulamentados pela NBR 16916 (ABNT, 2021b). A Figura 21 revela a aparência visual apresentada pelo agregado miúdo.

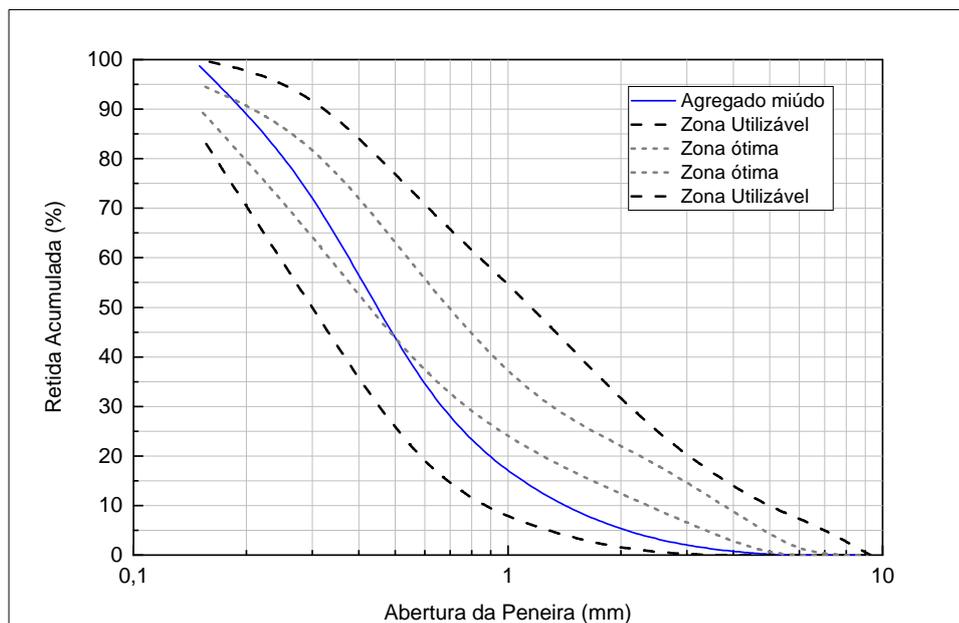
Figura 21 – Aparência visual da areia



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Na Figura 22 é apresentada a curva granulométrica da areia natural, juntamente com os limites de zona ótima e utilizável estabelecidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Os resultados revelaram uma dimensão máxima de 1,18 mm, um módulo de finura de 2,19, com massa específica média na condição seca de 2,52 g/cm³, na condição saturada superfície seca de 2,53 g/cm³ e absorção de água de 0,39%. Ao observar a curva da areia natural, identificada na cor azul, percebe-se que a curva granulométrica se encontra, em sua totalidade, dentro dos limites dada zona utilizável, no entanto, apresenta uma deficiência de grãos com granulometria acima de 0,60 mm. Segundo a classificação da NBR NM 248 (ABNT, 2003), a areia é considerada como fina e seu módulo de finura se encontra dentro do limite da zona utilizável inferior, o qual varia de 1,55 a 2,2. Ainda, foi realizado o ensaio do teor de torrões de argila e de materiais friáveis, normatizado pela NBR 7218 (ABNT, 2010a), onde verificou-se que o agregado continha uma contaminação de 0,9%, estando dentro do limite estabelecido pela norma, onde o máximo permitido é de 3,0%.

Figura 22 – Granulometria da areia



Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.1.4 ADITIVOS

Para confecção dos compósitos cimentícios foi utilizado o aditivo superplastificante, da marca comercial *Tecnosil*, denominado Silicon NS High 200, no intuito de melhorar a trabalhabilidade da mistura. Visto que a incorporação de fibras, segundo a literatura, tende a prejudicar esta propriedade, assim como o polímero quando adicionado na condição seca. Este superplastificante é um aditivo orgânico à base de policarboxilatos de última geração, que segundo o fabricante, proporciona uma excelente dispersão, elevada trabalhabilidade, redução de água de amassamento e ganho de resistência mecânica, sendo indicado para, entre outros, o concreto de pisos e pavimentos e para concretos de alto desempenho. Possui uma massa específica que varia entre 1,05 e 1,07 g/cm³ e a dosagem recomendada é de 0,2 a 2,0% em relação ao peso de cimento.

4.1.5 MACROFIBRA BARCHIP

Comercialmente conhecida como fibra Barchip, é considerada uma macrofibra sintética, fabricada a partir do polipropileno modificado, produzidas pela empresa *Elasto Plastic concrete*. Segundo o fabricante estas fibras têm a função de reforçar o concreto, podendo substituir a armadura tradicional, telas soldadas e fibras de aço. Além disso, apresenta nervuras que aumentam a ancoragem da fibra no concreto, melhorando o controle de fissuração da matriz, conforme mostra a Figura 24. Este material é recomendado, entre outras aplicações, para o uso em pavimento com a dosagem

de 2,5 a 6,0 kg/m³. A Tabela 6 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas apresentadas pelas fibras, enquanto a Figura 23 apresenta o aspecto visual da fibra.

Tabela 6 – Características da macrofibra Barchip

Especificações	Dados
Matéria-prima	Polipropileno modificado
Durabilidade em meio alcalino	Excelente
Absorção de água	Zero
Densidade específica	0,90 a 092
Comprimento	58 mm
Textura superficial	Nervurado contínuo
Quantidade de fibras	235.000 fibras/kg
Resistência à tração	> 640 MPa
Módulo de elasticidade	> 10 GPa
Ponto de fusão	150 - 170 °C
Ponto de ignição	> 450 °C

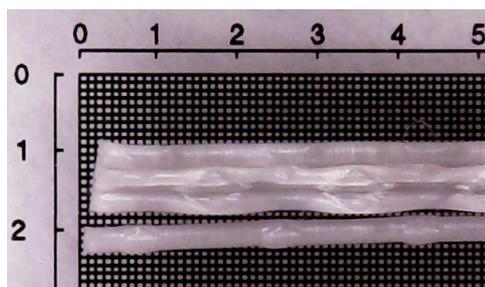
Fonte: Dados fornecidos pela empresa Elasto Plastic Concrete.

Figura 23 – Aspecto visual da macrofibra Barchip



Fonte: Elaboração própria, (2021).

Figura 24 – Geometria e aspecto da fibra Barchip

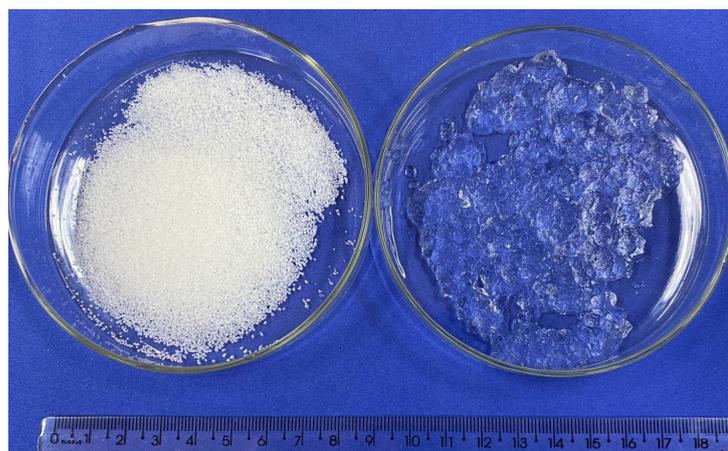


Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.1.6 POLÍMERO SUPERABSORVENTE

O polímero utilizado trata-se de um polímero superabsorvente constituído a base de poliacrilato de sódio produzido pela empresa *Basf* denominado como SMS Development Polymer PX. Sendo um dos polímeros mais utilizados comercialmente, principalmente para a fabricação de fraldas descartáveis, é sintetizado pela polimerização dos monômeros de ácido acrílico (KONO; FUJITA, 2012). Este polímero possui elevada capacidade de absorção em água, se comportando como um agregado de partículas finas no estado seco, e como um hidrogel no estado saturado. A Figura 25 apresenta o polímero no estado seco e no estado saturado, o que nos permite realizar uma comparação visual da variação da textura e do aspecto do polímero após a absorção de água da torneira. Ressalta-se que a quantidade de polímero não é comparável, uma vez que a imagem do polímero saturado refere-se a uma quantidade irrisória de polímero no estado seco, com a qual não se poderia comparar os dois estados.

Figura 25 – Comparação visual do aspecto do polímero seco (esquerda) e saturado (direita)



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Dentre as propriedades revelantes para caracterização do polímero, algumas foram fornecidas pelo fabricante, e encontram-se na Tabela 7, porém devido ao número insuficiente de informações, combinado com o uso incomum deste polímero para este fim, fez-se necessário a realização de ensaios. Os ensaios se concentram em determinar a granulometria, densidade real, aspecto das partículas, absorção em água e principalmente absorção em meio cimentício. A capacidade de absorção do SAP, varia de acordo com as propriedades do meio aquoso em que esta inserido e isto, influencia na porcentagem de incorporação de SAP e na quantidade de água extra a ser adicionada na mistura, o que afeta diretamente seu potencial de reduzir a retração.

Tabela 7 – Características do polímero superabsorvente

Especificações	Dados
Matéria-prima	Ácido poliacrílico, sal de sódio e reticulado
Estado físico	Sólido
Formato	Granular
Cor	Branco
Odor	Inodoro
PH	Aproximadamente 6,0
Densidade aparente	0,70 g/cm ³

Fonte: Dados fornecidos pela empresa Basf.

4.1.6.1 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO LIVRE

O ensaio de capacidade de absorção livre foi realizado através de dois métodos, o método do *teabag* e o método do cilindros graduados. Ambos realizados no intuito de obter uma maior confiabilidade dos resultados, já que esta característica está intimamente relacionada ao efeito do polímero na mitigação da retração.

O ensaio do *teabag* foi realizado para 4 amostras nas mesmas condições de temperatura e umidade. Primeiramente o filtro de tecido, foi umedecido em água e teve sua massa aferida. Na sequência, uma quantidade de aproximadamente 0,30 g de SAP foi colocada no filtro e, então, o conjunto foi mantido em submersão com água da torneira. Após 12 h de submersão, o que proporcionou a completa saturação do polímero, o conjunto foi retirado da água e procedeu-se o processo de drenagem do excesso de água, que consistiu em deixar a água extra escorrer pelo filtro por cerca de 1 h. Por fim o conjunto foi novamente pesado. A Figura 26 exemplifica todo o procedimento de realização deste ensaio. A partir da diferença entre a massa seca e saturada, a absorção média foi determinada em 202,33 g de água/g de polímero.

Figura 26 – Procedimento de ensaio *teabag*

(a) Massa do filtro na condição saturada superfície seca



(b) Massa de uma pequena quantidade de polímero



(c) Saturação do polímero por 12 h



(d) Massa do conjunto com o SAP saturado

Fonte: Elaboração própria, (2022)

O ensaio dos cilindros graduados foi determinado para 2 amostras, ambas também realizadas em condições semelhantes de temperatura e umidade. Primeiramente foi determinado o valor da densidade aparente do polímero, no qual uma quantidade conhecida de SAP na condição seca foi adicionada ao cilindro graduado e o volume ocupado por este material foi determinado. Deste modo, obteve-se uma densidade de $0,70 \text{ g/cm}^3$, valor este condizente ao fornecido pelo fabricante. Na sequência, uma pequena quantidade de SAP, cerca de $0,50 \text{ g}$, foi colocada dentro do cilindro e mantida por 12 h na condição saturada em uma quantidade abundante de água. Após a estabilização, foi determinado o volume ocupado pelo polímero saturado e com o auxílio da Equação 3.1, a absorção média foi determinada em $188,1 \text{ g}$ de água/g de polímero em água da torneira e de $261,9 \text{ g}$ de água/g de polímero para água deionizada, o que comprova que a concentração de íons afeta fortemente a absorção. A Figura 27 ilustra o procedimento do ensaio realizado.

Figura 27 – Procedimento de ensaio do cilindros graduado



(a) Determinação da densidade aparente



(b) Pequena quantidade de polímero



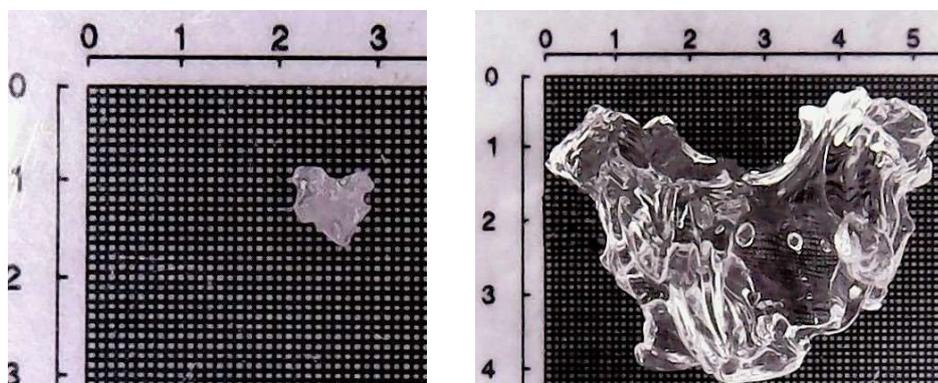
(c) Polímero saturado em água

Fonte: Elaboração própria, (2022)

Na Figura 28 é apresentada uma imagem comparativa, entre o formato de um pequeno grão do polímero no estado seco e após a saturação em água da torneira. Pela análise é possível observar o aspecto irregular do grão, que permanece semelhante mesmo após a saturação. Além disso, pode-se observar a elevada capacidade de absorção que ele apresenta, passando de uma dimensão no eixo x de aproximante 1 mm para cerca de 5 mm, e no eixo y de 0,7 mm para 4 mm. De acordo com os ensaios realizados o fator de absorção média é 195,4 g de água para cada 1 g de polímero em água da torneira.

Outro fator relevante, é o fato de que mesmo após a absorção o polímero conserva seu formato, perdendo apenas o aspecto esbranquiçado e tornando-se transparente devido a grande quantidade de água presente. O gel formado apresenta resistência ao toque e não se desfaz ao ser movimentado, ademais o líquido absorvido é mantido "preso" dentro do gel e apenas liberado quando a umidade do ambiente circundante é reduzida. Ainda, após a saturação o polímero apresenta uma grande força de atração, devido a interação entre as moléculas de água, o que dificulta a separação dos grãos e que pode interferir negativamente no concreto, criando grandes vazios após a dessorção e conseqüentemente pontos fracos que prejudicam as características mecânicas.

Figura 28 – Análise comparativa no formato de um grão de polímero na condição seca (esquerda) e na condição saturada(direita)



Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.1.6.2 CAPACIDADE DE ABSORÇÃO EM MEIO CIMENTÍCIO

Este ensaio consistiu em moldar argamassas com diferentes teores de relação água/cimento (a/c) e avaliar seu espalhamento ao longo do tempo, no intuito de determinar a absorção do polímero em meio cimentício. Cabe lembrar que este ensaio tem como objetivo obter um espalhamento similar entre as argamassas (com e sem SAP). Para tanto, as argamassas foram executadas seguindo o mesmo traço que será aplicado nas amostras de concreto, desconsiderando o agregado graúdo e as fibras, conforme mostra a Tabela 8. O traço utilizado neste ensaio teve o intuito de reproduzir, de maneira mais fielmente possível, as condições de ph e concentração de íons da mistura final de concreto.

Tabela 8 – Traço da argamassa em kg/m^3

Cimento	Areia	Aditivo	Teor de SAP	Relação a/c
411,0	807,0	0,5%	0,2%	0,34
411,0	807,0	0,5%	0%	0,29
411,0	807,0	0,5%	0%	0,295
411,0	807,0	0,5%	0%	0,30

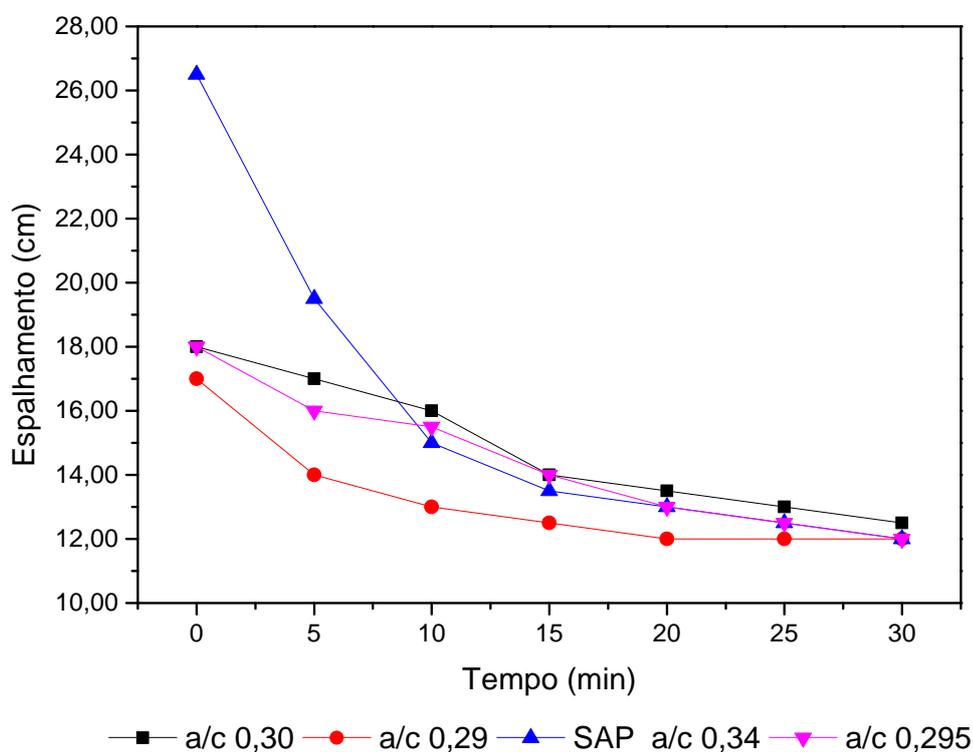
Fonte: Elaboração própria, (2022).

Ao todo foram moldadas 4 argamassas com diferentes teores de água, incluindo uma amostra contendo o SAP na proporção de 0,2% em relação ao peso de cimento e uma relação a/c de 0,34. O SAP foi inserido juntamente com o cimento na condição seca. O teor de SAP e as relações a/c foram determinadas através de tentativas e erros, em que fosse possível obter condições adequadas de espalhamento (i.e. entre 15 e 30 cm). O procedimento do ensaio seguiu as recomendações da DIN 18555-2 (1982) conforme mostra a Tabela 2, já explanado na Seção 3.4.1. O ensaio foi realizado

nas mesmas condições de temperatura e umidade (20,8 °C e 58%), no intuito de evitar possíveis variações de perda de água para o ambiente.

Na Figura 29 é apresentado o gráfico do espalhamento ao longo do tempo para todas as argamassas. O tempo zero apresentado no gráfico se refere à primeira medição realizada, que ocorreu quando a argamassa já estava à 5 min em processo de hidratação. Ao observar, as diferentes curvas é possível perceber que a curva com a relação de 0,295 é a que mais se aproxima da argamassa com SAP, principalmente no tempo máximo de observação, no qual o polímero já estava, certamente, saturado.

Figura 29 – Espalhamento de argamassas



Fonte: Elaboração própria, (2022).

A partir da Equação 3.2 foi possível determinar que o SAP absorve cerca de 20 g de água/g de polímero. Além disso, observando a curva de espalhamento da argamassa percebe-se que o polímero não absorve a água de maneira imediata, como já era esperado. A absorção começa logo após contato com a água e se estende até cerca de 15 min, período em que o espalhamento decaí para valores próximos da argamassa com a/c 0,295. Este dado é revelante para a produção dos concretos, que deverão obrigatoriamente ficar em mistura por pelo menos 20 min, afim de garantir a absorção completa do polímero.

4.1.6.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

A massa específica do polímero é um importante parâmetro para auxiliar os ensaios de absorção dos polímeros, pois atua como um instrumento de transformação de

unidades de medida, possibilitando a execução de diferentes métodos de determinação de absorção por volume, quanto por massa (COUTO, 2016). A massa específica real do SAP na condição seca foi determinada nesta pesquisa norma NBR 16605 (ABNT, 2017a), comumente utilizada para materiais pulverulentos, o esquema do ensaio é apresentado na Figura 30. Ensaios prévios permitiram constatar que o polímero não absorve e nem se degrada ao ser imerso em querosene, portanto, este foi o líquido utilizado para determinar esta propriedade. O resultado da massa específica real foi de $1,62 \text{ g/cm}^3$, enquanto a massa específica aparente é $0,70 \text{ g/cm}^3$.

Figura 30 – Densidade do polímero superabsorvente



(a) Líquido em banho maria de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min



(b) Aferição da massa e volume do frasco com líquido



(c) Líquido e polímero em banho maria de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min



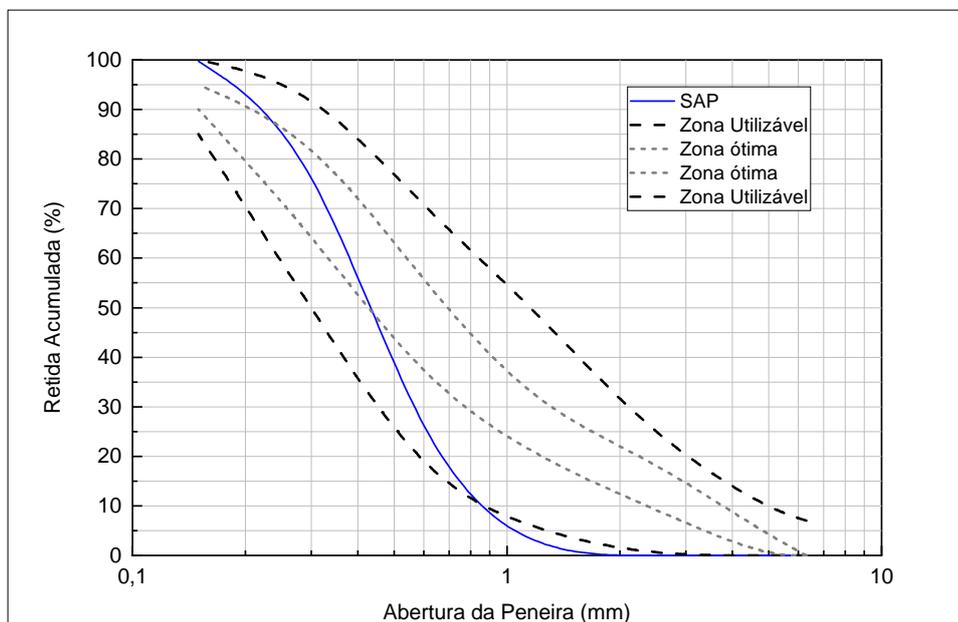
(d) Aferição da massa e volume do frasco com líquido e polímero

Fonte: Elaboração própria, (2022)

A granulometria foi determinada pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) comumente utilizada para determinar a granulometria de agregados miúdos. Este ensaio permitiu concluir que o SAP tem a granulometria compreendida entre 600 a $75 \mu\text{m}$, sendo que mais de 80% das partículas possui dimensões entre 600 a $300 \mu\text{m}$. A Figura 31 apresenta a granulometria do polímero e os limites da zona ótima e utilizável apresentados pela norma. Apesar desta granulometria fornecer uma ideia da distribuição dos grãos,

não pode ser tida como absoluta verdade, já que os grãos do polímero apresentam formato irregular.

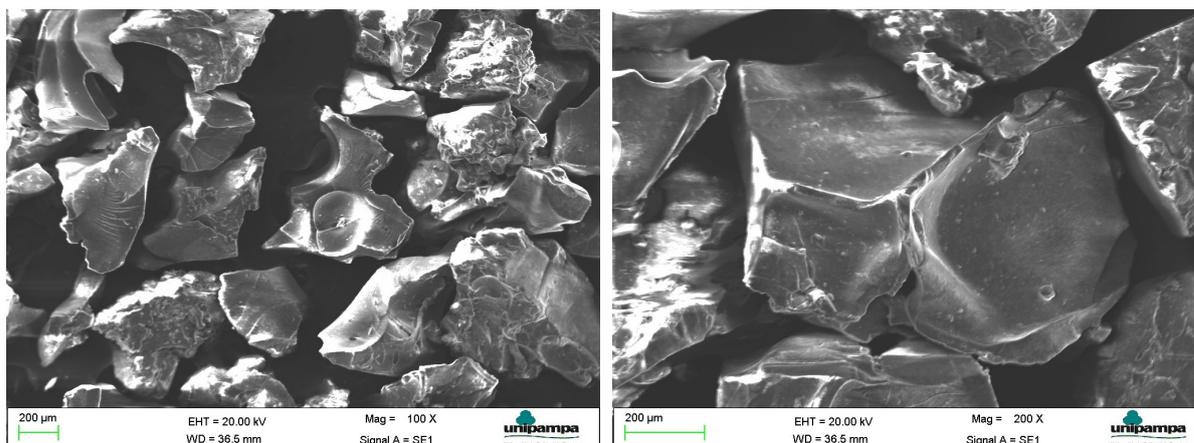
Figura 31 – Granulometria do polímero superabsorvente



Fonte: Elaboração própria, (2021).

Na Figura 32 são apresentadas duas imagens realizadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) com o polímero no estado seco, na imagem da esquerda a ampliação é de 100x e na direita de 200x. Pela análise é possível observar que as partículas são irregulares, com tamanhos e arestas variáveis, parecendo-se com pedaços de vidro quebrado, conforme comparação feita por Manzano (2016). Pelo formato das partículas, é possível indicar que o polímero estudado foi fabricado a partir da polimerização por solução. Neste processo, a formação dos grãos (moagem) ocorre quando o gel está no estado seco, ou seja, as partículas são quebradas e o resultado final, são grãos irregulares com arestas pontiagudas (FRIEDRICH, 2012).

Figura 32 – Análise da geometria do SAP através do MEV



Fonte: Elaboração própria, (2021).

4.1.6.4 ÁGUA PARA A CURA INTERNA E TEOR DE SAP

A relação a/c foi determinada, a partir da dosagem do traço padrão, em 0,357, no entanto, quando utilizada a cura interna esta relação a/c variou em função da saturação do SAP. Para determinar o teor extra de água baseou-se no modelo de Powers, onde a partir da relação a/c fixada foi possível determinar a água necessária para saturar o polímero e, assim mitigar a retração. Utilizando a Equação 3.11, recomendada para traços com relação a/c menor que 0,36, foi possível determinar que a quantidade extra de água adicionada (a/c_e) é de 0,064, totalizando assim um teor de 0,421 para os traços que contendo SAP.

Assim como o teor de água, o teor de SAP é determinado para ter a capacidade de inibir a retração. O teor de polímero, por sua vez, é baseado na relação entre a quantidade de água extra (a/c_e) e a quantidade de absorção em meio cimentício, determinada pela Equação 3.2 e com um valor de 20 g/g. A partir da Equação 3.13 foi possível determinar o teor de 1,32 kg/m³ de SAP ou 0,32% em relação do peso de cimento.

4.2 DOSAGEM, PROCEDIMENTO DE MISTURA E CURA DOS CORPOS DE PROVA

O traço a ser executado nesta pesquisa refere-se a uma mistura para pavimentos de concretos, com um teor de argamassa de 52% e com elevada capacidade resistente, com fck variando entre os traços de 55 a 65 MPa. O fato de possuir resistência elevada propicia uma maior densidade, menor porosidade e, conseqüentemente, uma maior taxa de retração nas primeiras idades, o acaba por favorecer a intensidade das incógnitas desta pesquisa.

A nomenclatura adotada para designação de cada traço encontra-se na Tabela 9. As proporções das misturas dos compósitos cimentícios, com dois diferentes tipos de

adições podem ser visualizadas na Tabela 10, que apresenta as quantidades em kg/m³. Já na Tabela 11 é apresentada a dosagem unitária dos traços, nesta as quantidades de fibras referem-se ao volume total de 1 m³, já que sua adição é baseada no volume total, enquanto, o teor de SAP e relação a/c referem-se ao peso de cimento do traço. A relação a/c para os traços foi fixada em 0,357, já os traços contendo polímero recebem uma adição extra de água de 0,0064, totalizando uma relação a/c de 0,421, valor este determinado pelo modelo de Powers.

Tabela 9 – Nomenclatura adotada para designar os diferentes traços

Denominação	Código
Referência	Ref
Referência e polímero superabsorvente	Ref-SAP
Barchip	Bar
Barchip e polímero superabsorvente	Bar-SAP

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Tabela 10 – Dosagem dos traços em peso

Código	Quantidade de materiais (kg/m³)						
	Cimento	Areia	Brita	Barchip	SAP	Aditivo	Água
Ref	411,0	807,0	1118,0	-	-	1,64	146,73
Ref-SAP	411,0	807,0	1118,0	-	1,32	1,64	173,03
Bar	411,0	807,0	1118,0	4,55	-	2,05	146,73
Bar-SAP	411,0	807,0	1118,0	4,55	1,32	2,05	173,03

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Tabela 11 – Dosagem unitária dos traços

Código	Quantidade de materiais						
	Cimento	Areia	Brita	Barchip	SAP	Aditivo	a/c
Ref	1,0	1,96	2,72	-	-	0,4%	0,357
Ref-SAP	1,0	1,96	2,72	-	0,32%	0,4%	0,421
Bar	1,0	1,96	2,72	0,5%	-	0,5%	0,357
Bar-SAP	1,0	1,96	2,72	0,5%	0,32%	0,5%	0,421

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Os traços de concretos foram produzidos em uma betoneira de eixo inclinado, seguindo uma criteriosa ordem de mistura, no intuito de evitar a influência de possíveis variáveis, a qual é apresentada na Tabela 12. O ensaio de espalhamento da argamassa revelou que o SAP demora cerca de 20 min para absorver completamente a água, neste sentido, o procedimento de produção das misturas foi estabelecido com duração de 30 min para garantir a total absorção do polímero. Além disso, quando utilizado

o polímero superabsorvente, este foi previamente misturado no estado seco com o cimento para evitar a formação do *gel bloking*, condição em que as partículas do SAP, ao entrarem em contato com água, se aglomeram e evitam a absorção completa de todos os grãos (FRIEDRICH, 2012).

Tabela 12 – Procedimento de mistura dos concretos

Procedimento	Tempo de mistura	Tempo total
Adicionar a brita e parte da água	1 min	-
Adicionar o cimento	3 min	3 min
Adicionar a areia e o restante da água	5 min	8 min
Adicionar 1/3 do aditivo	5 min	13 min
Adicionar 1/3 do aditivo	5 min	18 min
Adicionar a fibra	5 min	23 min
Adicionar 1/3 do aditivo	5 min	28 min
Realizar o ensaio de <i>Slump Test</i>	2 min	30 min

O aditivo foi previamente diluído em 600 ml de água pertencente ao traço.

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Ao final de cada mistura, como mencionado na Tabela 12, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone ou *slump test*, conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020) a fim de controlar consistência e trabalhabilidade para todas as misturas, a qual variou de 10 a 13 cm. Esta variação ocorreu devido a variação de temperatura e umidade, uma vez que a sala de concretagem não é climatizada. Após a moldagem, os corpos de prova foram cobertos com um material plástico, com a finalidade de evitar a perda de umidade para ambiente. A desmoldagem ocorreu após 24 h para todos os espécimes, exceto os destinados ao ensaio de retração livre, que segundo a ASTM C157/C157M (2017) devem ser desmoldados após 20 h, para que a primeira leitura seja efetuada com 24 h.

Quando ao procedimento de cura, todos os corpos de prova foram mantidos em cura saturada com água e cal até a idade de ensaio, exceto os corpos de prova destinados aos ensaios de retração livre e liberação de calor de hidratação. Esta modificação no processo de cura objetivou evidenciar as características em análise, além de facilitar o procedimento do ensaio. Os corpos de prova destinados ao ensaio de liberação de calor de hidratação receberam a cura adiabática que se refere a um processo em que a amostra é acondicionada de forma a não haver troca de calor com o ambiente. Enquanto os corpos de prova destinados ao ensaio de retração livre receberam dois distintos tratamentos, a cura selada com película seladora e a cura ao ar, onde não foi empregado nenhum método de cura. Estes procedimentos estão melhor detalhados em seus respectivos ensaios.

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MECÂNICA DOS COMPÓSITOS

Nesta seção são apresentados e descritos os ensaios adotados para esta pesquisa. Os ensaios empregados possuem como objetivo obter parâmetros para quantificar e qualificar os compósitos cimentícios quanto a retração e a resistência mecânica, comparando os efeitos da inclusão da macrofibra PP e o do agente de cura interna. A Tabela 13 apresenta de forma resumida os ensaios que foram realizados durante esta pesquisa, bem como o número de espécimes ensaiados e a idade de realização de cada ensaios.

Tabela 13 – Resumo da metodologia

Ensaio	Nº de espécimes	Idade do ensaio
Curva de liberação de calor	1	Moldagem até 72 h
Retração livre	4	24 h até 40 dias
Absorção e índice de vazios	4	7 e 28 dias
Capilaridade	3	28 dias
Resistência à compressão	4*	7, 14 e 28 dias
Resistência a tração na flexão	4*	7, 14 e 28 dias
Módulo de elasticidade estático	-	7, 14 e 28 dias
Módulo de elasticidade dinâmico	3	28 dias

* quatro espécimes para cada idade

Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.3.1 LIBERAÇÃO DE CALOR DE HIDRATAÇÃO

O ensaio consiste em determinar a quantidade de calor e/ou a variação de temperatura liberada pela hidratação do concreto, desde sua moldagem até a estabilidade da temperatura. Apesar de não ser normatizado, este ensaio é um método simples que permite uma análise comparativa do calor liberado durante a hidratação inicial de diferentes compósitos. Esta metodologia foi utilizada por Righi (2015) e mostrou-se adequada para avaliar estas propriedades.

Como resultado deste ensaio, tem-se uma curva de liberação do calor, que é composta por um pico de elevação brusca da temperatura, devido aos ápices das reações, seguida pela estabilização da temperatura que evidencia a redução dos processos de hidratação. Desta forma, será possível avaliar o efeito do emprego macrofibra Barchip e do uso do polímero superabsorvente como agente de cura interna, que segundo a literatura tende a retardar e reduzir o pico de calor.

Para este ensaio, foi moldado apenas um espécime para cada um os diferentes traços estudados. Como molde utilizou-se formas sextavadas, comumente empregadas para fabricação de pavers, com dimensões de 25 x 25 x 8 cm (largura x comprimento x altura), como é mostrado na Figura 33a. Vale ressaltar que este ensaio foi realizado aos pares para eliminar possíveis variáveis e assim permitir uma correta comparação entre

os dados. Desta forma, foram concretados aos pares os traços Barchip e Barchip-SAP, e Referência e Referência-SAP.

Após a moldagem, os corpos de prova foram conectados à termorresistências do tipo PT100 com faixa de leitura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, responsáveis por realizar a leitura dos dados da liberação de calor. O sensor de temperatura foi conectado no centro do corpo de prova, como pode ser visto na Figura 33b. Posteriormente o conjunto foi acomodado em uma caixa de isopor, que teve suas aberturas vedadas, no intuito de criar um sistema adiabático conforme ilustra a Figura 33c. Ainda, todo o conjunto foi mantido em uma sala climatizada à $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ para evitar possíveis influências externas, onde permaneceu durante toda a duração do ensaio que se manteve até a estabilização da temperatura. A termorresistência foi conectada a um sistema de leitura de dados, que armazena as leituras e as transfere para o computador para que a curva de liberação de calor possa ser construída. Vale ressaltar que este método serve de balizador para comparar os diferentes compósitos e a influência dos materiais no processo de hidratação.

Figura 33 – Configuração do ensaio da curva de liberação de calor



Fonte: Elaboração própria, (2022)

4.3.2 RETRAÇÃO LIVRE (RETRAÇÃO AUTÓGENA E RETRAÇÃO POR SECAGEM)

O ensaio de retração livre, foi realizado de acordo com a ASTM C157/C157M (2017). Este teste consiste em avaliar a variação dimensional do material, desconsiderando o efeito variável da temperatura e das tensões de restrição, obtendo assim, a retração nas primeiras idades do compósito. Para tanto, foram moldados 4 corpos de prova prismáticos de $7,5 \times 7,5 \times 28,5$ cm para cada traço de concreto estudado, os quais possuíam pinos de aço inoxidável fixados as extremidades para possibilitar a medição da retração através da variação do comprimento, obtida com o auxílio de um relógio comparador de resolução de $0,01$ mm.

Este ensaio compreendeu dois diferentes processos de cura, no intuito de avaliar de forma isolada, a retração autógena e a retração por secagem. Para ambos os processos, o desmolde ocorreu após 20 h da concretagem e as primeiras leituras iniciaram 24 h e prosseguiram diariamente até os 40 dias. Para realização das leituras, os CP's eram posicionados em uma superfície plana, a fim de reduzir a probabilidade de erros nas leituras. A Figura 34 ilustra como foi realizada a medição do ensaio de retração livre. Durante toda duração do ensaio, os corpos de prova foram mantidos em uma sala com temperatura controlada de 22 ± 2 °C, além disso, foram armazenados sobre roletes, a fim de garantir a plena deformação em todas as direções, como mostra a Figura 35.

Figura 34 – Execução do ensaio de retração livre, calibração do equipamento (esquerda) e medição da variação dimensional (direita)



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Figura 35 – Armazenamento dos corpos de prova sobre roletes



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Os corpos de prova destinados ao ensaio de retração autógena receberam a cura selada, que compreendeu a aplicação de uma película seladora para impedir a troca de umidade com o meio externo. Para isto, os corpos de prova foram cobertos com duas camadas de plástico filme, seguida por uma camada de fita manta asfáltica, como mostra a Figura 12. Enquanto os espécimes destinados ao ensaio de retração por secagem não receberam nenhum tipo de cura, foram, portanto, desmoldados e levados à sala climatizada, onde permaneceram durante toda a duração do ensaio. Vale ressaltar que a cura selada objetivou evitar a retração por secagem, uma vez que impediu a troca de umidade com o meio circundante, permitindo a medição apenas da retração autógena. Enquanto, a não execução de nenhum tipo de cura visou permitir a ocorrência da retração por secagem juntamente com a retração autógena.

Figura 36 – Metodologia adotada para realizar a cura selada dos corpos de prova destinados ao ensaio de retração livre



Fonte: Elaboração própria, (2022).

A variação dimensional, também chamada de retração será expressa em porcentagem (%), sendo calculada através da razão entre as diferenças da leitura efetuada na idade desejada (L_i) e a leitura efetuada após a desforma (L_o) pelo comprimento de calibração (C_e), conforme mostra a Equação 4.1. Os valores de retração são plotados em um gráfico em função da idade.

$$\Delta L_i = \frac{L_i - L_o}{C_e} * 100 \quad (4.1)$$

4.3.3 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Este ensaio foi realizado no intuito de verificar a variabilidade, quando incrementados os materiais mitigadores da retração, principalmente na absorção e índice de vazios, visto que o polímero tende a modificar a porosidade da matriz. Este ensaio seguiu as recomendações normativas da NBR 9778 (ABNT, 2005b), portanto, foram moldados 4 corpos de prova para cada traço nas dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), executados conforme as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015), os quais foram mantidos em cura saturada com água e cal até a idade de ensaio, aos 7 e aos 28 dias.

O procedimento deste ensaio ocorre da seguinte forma: após o período de cura, a amostra é seca em estufa por 72 h à uma temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e então sua massa (m_s) é determinada, no entanto, devido à problemas com a deterioração da fibra este ensaio também foi realizado com temperatura de $80 \pm 5^\circ\text{C}$. Na sequência, a amostra é deixada imersa em água por 72 h à uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, após este período, a temperatura da água é elevada gradualmente até a atingir a ebulição, permanecendo neste condição por 5 h. Ao final deste período a água é naturalmente resfriada até novamente atingir a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e assim a massa submersa (m_i) é registrada. E por fim, a amostra é retirada da água e sua massa na condição saturada superfície seca (m_{sat}) é determinada. Em posse destes valores, é determinada a absorção (Equação 4.3), o índice de vazios (Equação 4.2) e a massa específica real (Equação) da amostra.

$$I_v = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_{\text{sat}} - m_i} * 100 \quad (4.2)$$

$$A = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{m_s} * 100 \quad (4.3)$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (4.4)$$

4.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O ensaio de capilaridade é normatizado pela NBR 9778 (ABNT, 2005b), e consiste a determinação da absorção através da ascensão capilar. Para este ensaio, foram moldados três corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm, para cada traço estudado. Os corpos de prova foram mantidos até a idade de ruptura, de 28 dias, em cura satura com água e cal.

O método consiste em manter os corpos de prova em contato com uma lamina d'água de aproximadamente 5 mm, medido a partir da sua base (Figura 37a. Para garantir o fluxo da água em apenas uma direção, os espécimes foram embalados com plástico filme a partir da marca, como mostra a Figura 37b. A massa dos espécimes é determinadas em intervalos de tempo de 3, 6, 24, 48 e 72 horas a partir do início do contanto com a água. Em posse destas medidas, a razão entre a diferença da massa nos intervalos menos a massa do corpo de prova seco, pela área da seção transversal é determinada, e com isso, a absorção por capilaridade em g/cm^2 (Equação 4.5). Após o término das aferições, os espécimes foram rompidos pelo método de compressão diametral, a fim de verificar a distribuição da água no seu interior, Figura 38a.

Figura 37 – Execução do ensaio de absorção de água por capilaridade



(a) Corpos de prova em contato com a lâmina de água de mm



(b) Embalagem dos corpos de prova

Fonte: Elaboração própria, (2022)

Figura 38 – Execução do ensaio de compressão diametral para determinação da altura de penetração de água



(a) Ensaio de compressão diametral



(b) Medição da penetração de água

Fonte: Elaboração própria, (2022)

$$C = \frac{m_{\text{sat}} - m_s}{S} \quad (4.5)$$

4.3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

O ensaio de resistência à compressão é normatizado pela NBR 5739 (ABNT, 2018) e consiste na determinação da resistência máxima à compressão, suportada por um corpo de prova cilíndrico com dimensões de 10 x 20 cm (diâmetro x altura), executado conforme as especificações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Foram moldados 4 corpos de prova para cada idade de ensaio, que ocorreram aos 7, 14 e 28 dias. Todas as amostras foram mantidas, até as datas de ruptura, em cura saturada com água e cal. Este ensaio permitiu avaliar o efeito do polímero superabsorvente ao longo do tempo e a influência do uso fibra na resistência mecânica.

Para realizar este ensaio, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de carga de 1500 kN, conforme mostra a Figura 39. Este ensaio foi realizado em velocidade conforme recomenda a norma e mantido até a ruptura dos espécimes, conforme ilustra a Figura 40 onde a ruptura ocorreu no formato cônico. Embora a resistência à compressão uniaxial não seja uma variável limitante para o dimensionamento de pavimentos, é importante sua verificação para análise da sua variabilidade em função da adição dos novos materiais, uma vez que, busca-se neste trabalho mitigar a retração e conservar as propriedades mecânicas.

Figura 39 – Prensa hidráulica utilizada para realizar o ensaio de compressão simples



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Figura 40 – Ensaio de compressão simples aplicado até a ruptura do espécime



Fonte: Elaboração própria, (2022).

4.3.6 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

A resistência à tração na flexão é um parâmetro fundamental na caracterização do concreto para uso em pavimentação, uma vez que o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece uma resistência à tração na flexão mínima de 4,5 MPa (DNIT, 2005). A determinação da resistência à tração na flexão em corpos de prova prismáticos foi realizada de acordo com a norma NBR 12142 (ABNT, 2010b), a qual estabelece que o ensaio seja feito em um viga simplesmente apoiada com duas forças aplicadas nos terços do vão. Os corpos de prova prismáticos com dimensões 10 x 10 x 40 cm foram executados conforme as especificações na NBR 5738 (ABNT, 2015) e ensaiados em uma prensa hidráulica, com capacidade de carga

de 200 kN e da marca comercial Emic, na velocidade de 0,05mm/min até a ruptura, conforme ilustra a Figura 41. E assim como no ensaio de resistência à compressão, os corpos de prova, mantidos em cura saturada, foram rompidos nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Figura 41 – Prensa hidráulica utilizada para realizar o ensaio de tração na flexão



Fonte: Elaboração própria, (2022).

A Equação 4.6 apresenta o cálculo para determinação da resistência, onde $f_{ct, f}$ é a resistência à tração na flexão em MPa, F é a carga de ruptura em Newton, l é a distância entre apoios em mm, b é a largura média do corpo de prova e d é a altura do corpo de prova em prova.

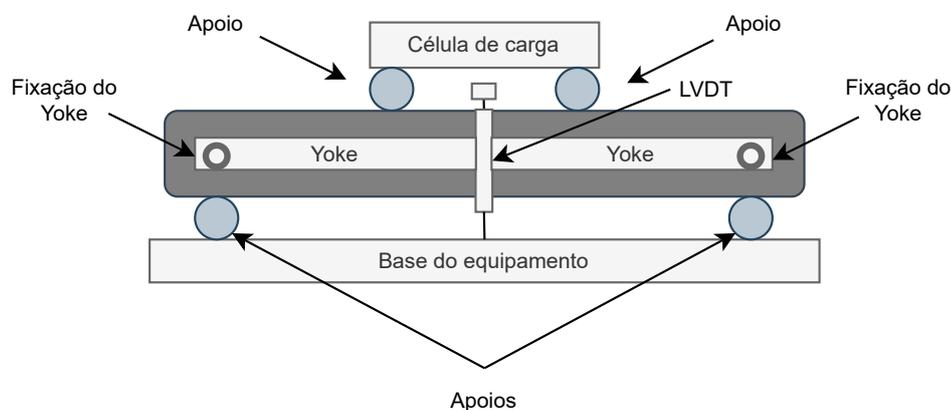
$$f_{ct, f} = \frac{F * l}{b * d^2} \quad (4.6)$$

4.3.7 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Neste trabalho, o ensaio de módulo de elasticidade foi determinado a partir dos resultados encontrados para o ensaio de resistência à flexão, seguindo a analogia de Mohr. Na qual será determinado, a partir de sensores de deformação, conhecidos como *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT), a flecha formada no centro da viga quando a carga aplicada por equivalente a valores entre 60 e 80% da carga de ruptura. A Figura 42a ilustra esquematicamente os aparatos necessários para a determinação

do módulo de elasticidade, enquanto a Figura 42b apresenta o esquema real utilizado neste ensaio.

Figura 42 – Aparatos para realização do ensaio do módulo de elasticidade estático



(a) Versão esquemática



(b) Versão real

Fonte: Elaboração própria, (2022)

O módulo de elasticidade é determinado de acordo com a Equação 4.7:

$$E = \frac{23 * P * l^3}{108 * b * h^3 * f} \quad (4.7)$$

Onde E é o módulo de elasticidade do concreto no ensaio de tração na flexão em MPa, P é a carga referente a um valor entre 60 e 80% da carga de ruptura em N, l é a dimensão do vão em mm, b é a largura do corpo de prova em mm, h é a altura do corpo de prova em mm, e f é a flecha no meio do vão em mm.

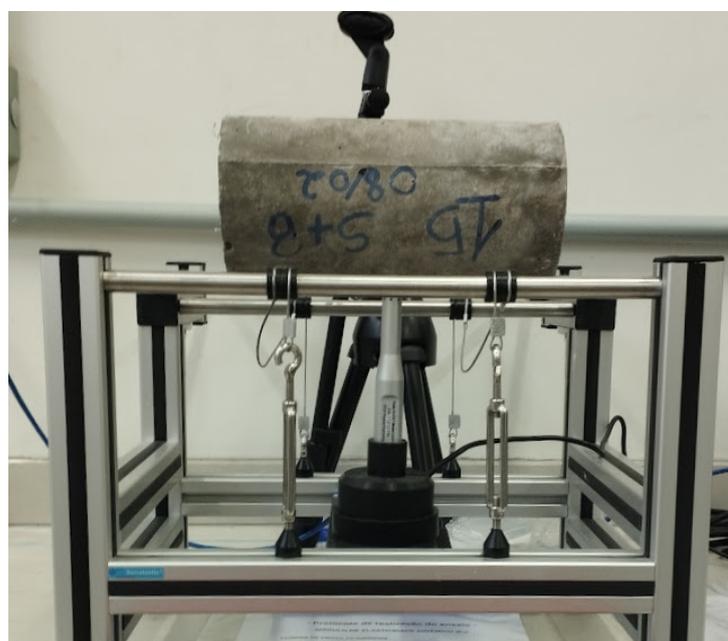
4.3.8 ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO POR IMPACTO

O módulo dinâmico pode ser determinado de forma não destrutiva pela resposta acústica de impulso, que se baseia nas normativas da NBR 8522 ABNT (2017b). Este ensaio consiste em manter o corpo de prova suspenso por cabos em seus pontos

nodais, no sentido da vibração de interesse. Para gerar o impulso, um haste de impacto com massa calibrada é utilizada, para excitar as frequências naturais de interesse, assim o som produzido é captado por um microfone posicionado no outro lado do objeto. A resposta acústica obtida é composta pela frequência natural de vibra do corpo que, por sua vez, é proporcional ao módulo de elasticidade associado à direção da vibração. Com base nas características básicas dos espécimes, dimensões e massa, e das frequências naturais de vibração, o cálculo do módulo de elasticidade é direto. O amortecimento nesse sistema de aquisição é calculado a partir do decremento logarítmico da amplitude de vibração, a partir da taxa de atenuação do sinal (DIÓGENES *et al.*, 2011).

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria, o equipamento utilizado era da marca comercial Sonelastic. O ensaio compreendeu aferir as dimensões dos espécimes, que foram inseridas diretamente no software do equipamento e este forneceu a posição de interesse da vibração que foi identificada no corpo de prova. Na sequência, o espécime foi posicionado no equipamento de forma centralizada e nivelada sobre o microfone e então, gerado o impulso no centro de prova, a Figura 43 ilustra o equipamento. Ao final, o software forneceu o valor do módulo de elasticidade dinâmico.

Figura 43 – Aparatos do ensaio de módulo de elasticidade dinâmico por impacto



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Popovics, Zemajtis e Shkolnik (2008) propuseram em seu estudo uma correlação proposta para transformar o módulo de elasticidade dinâmico (E_{cd}) em módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}). Sendo este modelo, uma derivação matemática robusta e concisa que leva em consideração a densidade aparente; não é um simples ajuste de curva. Desta forma, o E_{ci} é estimado empregando a Equação 4.8. Vale ressaltar que este ensaio foi realizado com o intuito de validar os resultados encontrados

através do módulo de elasticidade estático, para proporcionar maior segurança nos resultados.

$$E_{ci} = \frac{0,4275 * E_{cd}^{1,4}}{\rho} \quad (4.8)$$

Vale ressaltar que este ensaio foi realizado com o intuito de validar os resultados encontrados através do módulo de elasticidade estático.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a cada ensaio realizado, juntamente com sua respectiva análise e interpretação, de modo a auxiliar as conclusões da pesquisa, apresentadas no Capítulo 6.1. Vale salientar que todos os dados exibidos nos itens subsequentes foram tratados de forma a eliminar valores espúrios. A detecção dos dados espúrios foi realizada com o intuito de eliminar os dados que encontravam fora da curva, desta forma, através da análise dos dados, valores muito acima ou abaixo dos demais, foram desconsiderados.

5.1 LIBERAÇÃO DE CALOR DE HIDRATAÇÃO

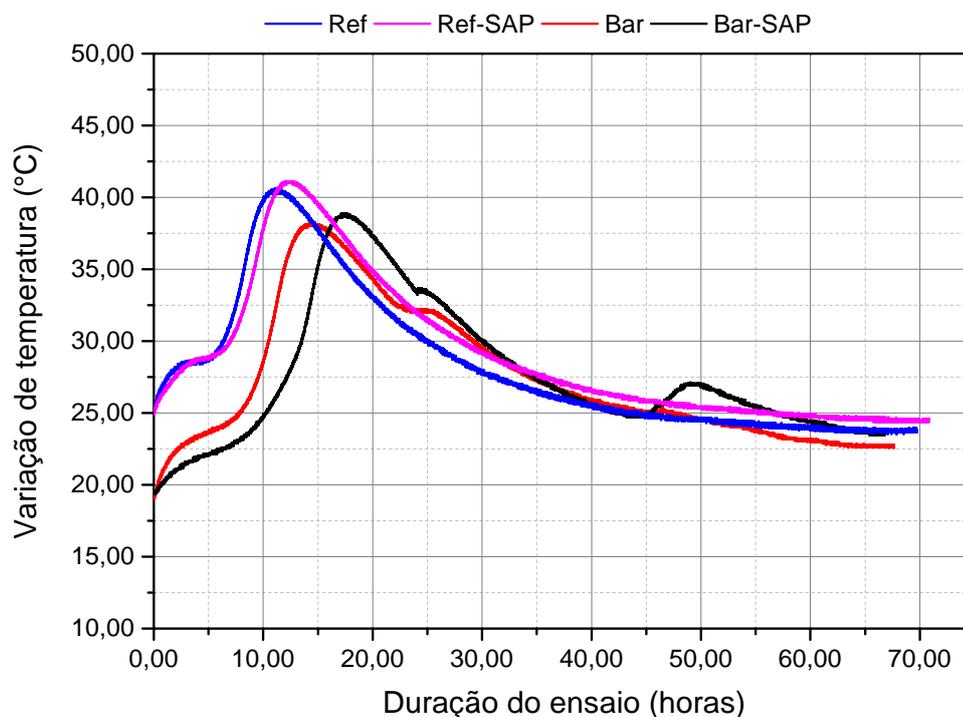
Na Figura 44 são apresentadas as curvas de evolução de temperatura durante as primeiras horas de hidratação para os diferentes traços estudados. Já na Figura 45 são apresentadas as curvas de variação da temperatura absoluta, obtidas pela diferença entre a temperatura inicial e a variação de temperatura ao longo do ensaio. A relação entre a variação máxima de temperatura atingida durante o ápice das reações e intervalo de tempo até a sua ocorrência, podem ser visualizados na Figura 47.

Ao observar os dados da Figura 44, nota-se que houve uma diferença de aproximadamente 5 °C no início dos experimentos, decorrente das variações climáticas durante a concretagem que ocorreram devido ao diferente período em que foram confeccionadas. As amostras de Ref e Ref-SAP foram moldadas no mesmo dia, a uma temperatura inicial de aproximadamente 25 °C (ambiente de laboratório), enquanto as amostras Bar e Bar-SAP foram moldadas em dia posterior a uma temperatura inicial de aproximadamente 20 °C. Vale ressaltar que logo após a concretagem, os espécimes foram acomodados em uma sala com temperatura controlada de 25 °C, onde permaneceram durante toda a duração do ensaio. O que pode ser verificado pela estabilização de temperatura das quatro curvas após 50 horas, onde todas se equilibraram à 25 °C. Além disso, observa-se que todos os traços apresentaram uma evolução de liberação de calor semelhante ao modelo idealizado por MEHTA e MONTEIRO (2006) para a pasta de cimento e apresentado no item 3.1.

Considerando ainda a Figura 44, percebe-se que os traços contendo fibra (Bar-SAP e Bar) apresentaram um retardo das reações de hidratação, em função, possivelmente, da menor temperatura durante a concretagem, o que dificultou o início da evolução dos processos. Ainda, os traço contendo fibra tiveram uma adição de 1% no teor de aditivo superplastificante, o que possivelmente levou modificou a cinética das reações destes traços ao comparar com seus referências, refletindo no atraso das reações observado na Figura 44. Para os traços Ref-SAP e Ref, o início do aumento da curva de liberação de calor ocorreu após 5 h do princípio da hidratação, e a intensificação processo iniciou após 9 h e 11 h, respectivamente. Enquanto, para os traço com fibra, Bar-SAP e Bar, o concreto começou a liberar calor apenas após

7 h de hidratação, com a intensificação em 12 e 15 h, respectivamente. Desta forma, a diferença de 5 °C somada ao aumento no teor de ativo, pode ter resultado em um retardo médio de 2 h para o início das reações e de 3,5 h para a crescimento efeito.

Figura 44 – Curvas de liberação de calor de hidratação para os diferentes traços pesquisados

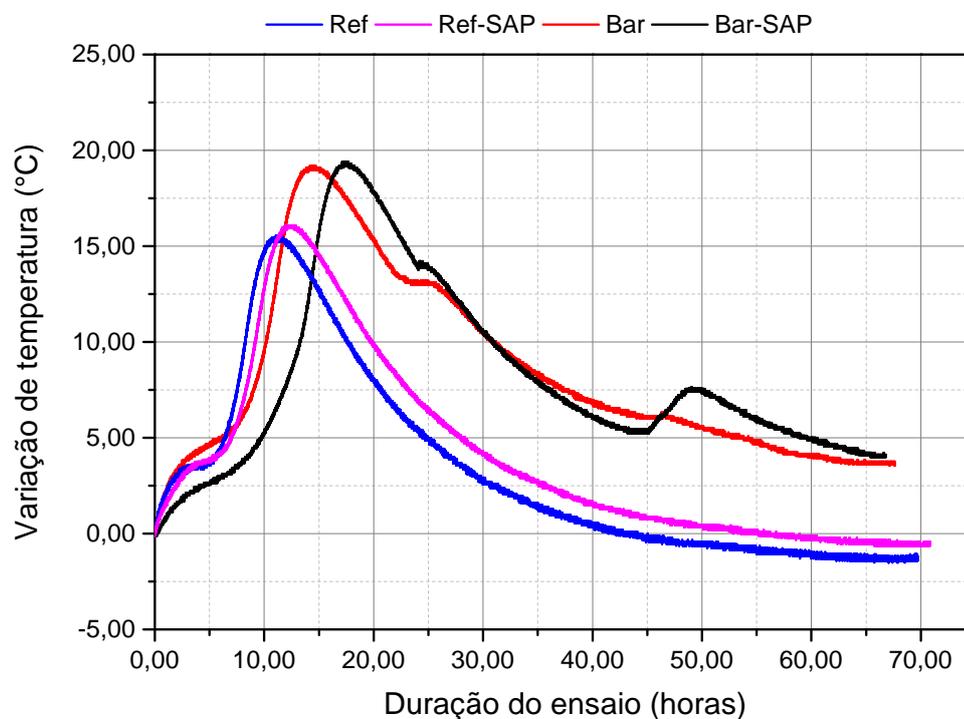


Fonte: Elaboração própria, (2022).

Na Figura 45 é apresentada a variação da temperatura absoluta para os distintos traços estudados. Percebe-se que mesmo com o ajuste do gráfico em função da temperatura inicial, os traços Bar-SAP e Bar apresentaram uma maior variação de temperatura de pico, sendo está de 13,4% e 19% em relação ao traços Ref-SAP e Ref, respectivamente. A intensificação do processo de hidratação pode ser explicada pelo retardo no início das reações, causadas pela presença da fibra, que concentraram a formação da portlandita e da tobermorita, que se cristalizaram em um maior volume, elevando a temperatura. Além disso, a presença da fibra pode ter criado uma barreira física que restringiu a movimentação da água, tanto para o processo de hidratação, quanto para a evaporação, permitindo que água estivesse disponível por um maior período de tempo dentro do concreto, o que melhorou a hidratação. Shen *et al.* (2020c) obteve resultados opostos, onde ao adicionar a fibra Barchip no concreto em um teor de 8 kg/m³, não foram verificadas diferenças na temperatura absoluta quando comparada a traços sem fibra. Contudo, a densidade da matriz estudada por estes autores pode ter influenciado no comportamento de hidratação. Um menor fator de empacotamento, está associando também, a uma maior conectividade dos poros capilares. Neste caso

a fibra pode não ter sido capaz de retardar ou bloquear a movimentação da água, não gerando, desta forma, efeitos no processo de hidratação.

Figura 45 – Variação da temperatura absoluta durante o processo de hidratação



Fonte: Elaboração própria, (2022).

A presença do polímero superabsorvente em ambos os traços, (Figura 44 e Figura 45) ocasionou um leve deslocamento da curva para a direita, representando um pequeno atraso na hidratação do cimento. Ainda, há uma leve tendência de aumento da temperatura com a adição do SAP, o que pode significar uma intensificação do processo de hidratação, devido a maior disponibilidade de água, como pode ser observado na Figura 46, onde a presença do polímero tende a modificar a coloração do concreto. O SAP atua como um regulador de água, ou seja, ele libera água em função da umidade relativa interna. Desta forma, o processo tende a ocorrer de forma mais lenta, porém por um maior período, assim, uma maior quantidade de grãos de cimento anidro são hidratados e há uma melhora na hidratação da matriz. De modo semelhante, a presença da fibra causa um aumento na variação de temperatura adiabática e um atraso no início das reações, contudo, seus efeitos são mais significativos que os do SAP. A fibra ao agir como uma barreira física dificulta a movimentação da água na matriz, minimizando possivelmente a taxa de evaporação de água, assim uma maior quantidade de água permanece disponível potencializando a hidratação. Os resultados encontrados por Lura (2003) e Shen *et al.* (2018) mostram que o aumento da temperatura adiabática pode corresponder a um aumento do grau de hidratação do CAR curado internamente com SAP. Desta forma, pode-se associar que a presença do

SAP e principalmente da fibra elevaram a hidratação da matriz.

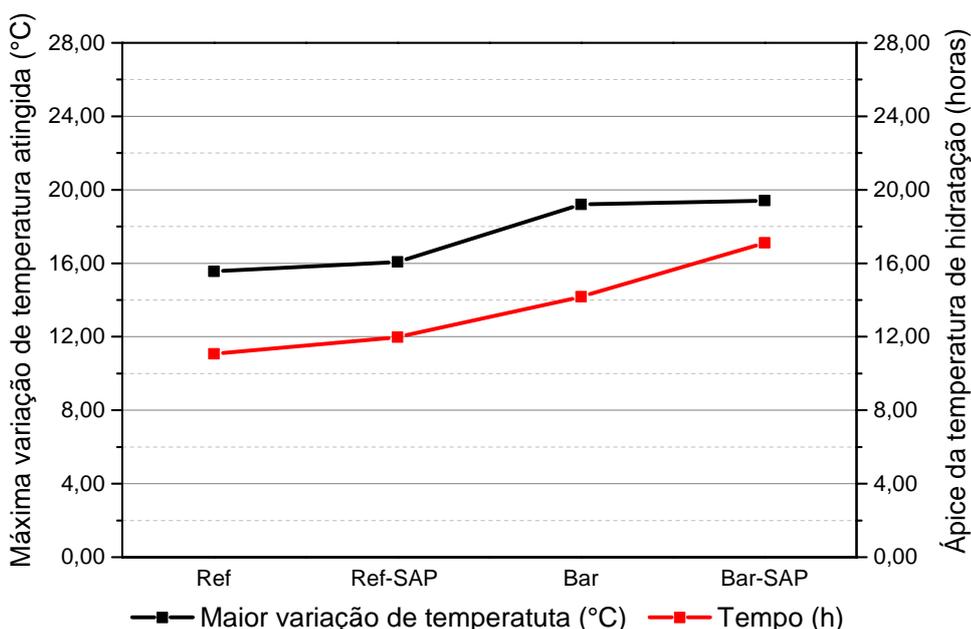
Já na Figura 47 são apresentadas as variações máximas de temperaturas atingidas durante o processo de hidratação e o tempo que levaram para atingir esta variação de temperatura. Percebe-se que há uma tendência de crescimento do tempo para o ápice das reações, para ambos os traços, com a adição de SAP e da fibra, revelando que a adição destes materiais podem causar um retardo no processo de hidratação. A máxima variação de temperatura, porém, apresenta um leve aumento frente a adição do SAP. A fibra, por sua vez, parece elevar a variação de temperatura em aproximadamente 4 °C, evidenciando uma intensificação da hidratação.

Figura 46 – Ápice das reações de hidratação



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Figura 47 – Ápice das reações de hidratação



Fonte: Elaboração própria, (2022).

5.2 ABSORÇÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

A Figura 49 apresenta um histograma com os valores médios de índice de vazios para as idades de 7 e 28 dias para o ensaio determinado conforme o item 4.3.3. É importante lembrar que, estes resultados foram encontrados para um ensaio realizado com a secagem dos espécimes em estufa à uma temperatura em estufa de 80 °C. Ainda, cabe ressaltar que, neste experimento, a absorção é baseada no processo em que a água tende a ocupar todos os poros da amostra. Desta forma, ao deixar a amostra imersa por completo em água, esta é forçada a fluir em todas as direções, fornecendo, assim, uma ideia da quantidade total de poros existente na estrutura do corpo de prova.

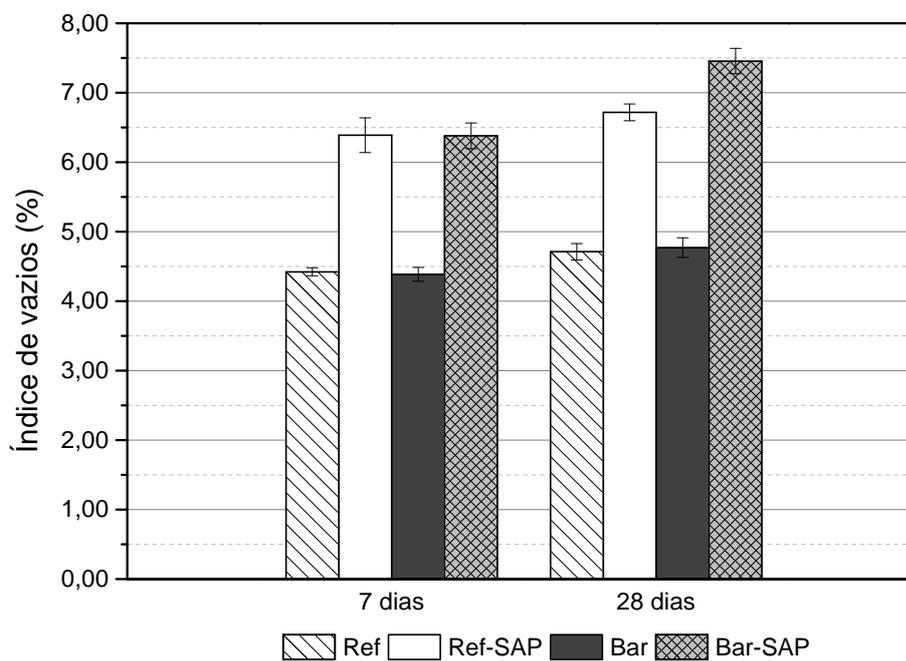
Este ensaio também foi realizado com a secagem em estufa a uma temperatura de 105 °C, conforme recomenda a norma, porém verificou-se que os traços contendo a fibra Barchip apresentaram degradação na parte externa do espécime, Figura 48. Apesar de visualmente não ser verificada a degradação na parte interna do corpo de prova, os resultados apresentaram significativa variação. Quando utilizada a temperatura de 80 °C, estipulada empiricamente para este ensaio, as fibras presentes no corpo de prova, de ambos os traços, mantiveram-se intactas. Portanto, esta temperatura foi fixada para todos os ensaios que necessitavam de secagem em estufa.

Figura 48 – Degradação da fibra a 105 °C na parte externa (acima) e interna (abaixo) dos espécimes



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Figura 49 – Valores médios para o ensaio de índice de vazios realizado a 80 °C



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Ao observar os dados da Figura 49 percebe-se que há um significativo crescimento no índice de vazios ao longo do processo de cura, Tabela 14. O menor índice de vazios nas primeiras idades, provavelmente se deve a presença de água que preenche e satura os poros e que futuramente é consumida pelo processo de hidratação. Tal fato, evidencia que a hidratação continua a evoluir ao longo do processo de cura, gerando modificações na microestrutura e nas propriedades do compósito.

Diferentemente dos demais, o traço Ref-SAP, de acordo com a Tabela 14, não apresentou, estatisticamente, diferença de 7 para 28 dias. Isto, pode estar relacionado a liberação precoce de água do SAP, que possivelmente ocorreu antes dos 7 dias, o que intensificou e acelerou a formação da microestrutura do concreto em idades precoces. O traço Bar-SAP, por sua vez, não apresentou o mesmo comportamento do Ref-SAP, neste houve um crescimento significativo. A fibra ao agir como uma barreira física, pode ter dificultado a movimentação da água capilar dentro na microestrutura do concreto. Além disso, o SAP, ao se fixar próximo a estrutura da fibra, pode ter criado uma zona frágil que modificou a estrutura de poros e elevando a porosidade, os quais se mostraram mais evidentes aos 28 dias quando os poros capilares encontravam-se vazios.

Ramezianpour *et al.* (2013) ao avaliarem a adição de microfibras de poli-propileno ($l_f=12$ mm e $d_f=18$ μ m) no concreto para dormentes, verificaram que a fibra eleva a porosidade do concreto, tornando não homogêneo. Os autores afirmam, ainda, que embora as fibras possam ser englobadas pelo gel C–S–H, a zona de interface entre os dois materiais ainda não apresenta uma compatibilidade perfeita, o que causa

uma aumento na porosidade e conseqüente redução da resistência à compressão. De forma semelhante, Rohollah *et al.* (2022), observaram um aumento na porosidade total ao incrementar a microfibras PP ($l_f=6$ mm e $d_f=18$ μ m) em argamassas. Segundo os autores, é devido à sua grande superfície de contato, que reduz a quantidade de pasta depositada ao redor de cada fibra. Adicionalmente, as fibras não uniformemente distribuídas e aglomerados podem quebrar a estrutura do gel C–S–H, aumentando a porosidade total.

Os resultados revelam também, que a presença da fibra Barchip não afeta o índice de vazios em nenhuma das idades, conforme mostra a Tabela 15. Porém, ao adicionar a fibra Barchip e o SAP de forma conjunta o comportamento se modifica. Aos 28 dias, o traço Bar-SAP ultrapassa o traço Ref-SAP, revelando uma modificação na microestrutura causada pelo uso combinado dos materiais. Ademais, o uso do polímero superabsorvente, como já esperado, eleva consideravelmente a propriedade em questão para ambos os traços. Dois fenômenos podem estar associados a esse aumento: primeiro, pelo fato do SAP ser um hidrogel que armazena água em seu interior, e que ao longo do processo de hidratação libera esta água, deixando em seu lugar um vazio; segundo, parte da água de cura interna pode ter sido liberada logo após a concretagem, elevando a quantidade de água para o amassamento do concreto. Desta forma, o traço Bar-SAP apresentou o maior índice de vazios, seguido do traço Ref-SAP, Bar e Ref.

Tabela 14 – Análise de Tukey para o ensaio de índice de vazios com nível de confiança de 95%: influência do tempo de cura

Traço	Combinações	Probabilidade	Significância
Ref	7 dias x 28 dias	2,42E-02	Sim
Ref-SAP	7 dias x 28 dias	1,12E-01	Não
Bar	7 dias x 28 dias	1,82E-02	Sim
Bar-SAP	7 dias x 28 dias	8,56E-04	Sim

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Tabela 15 – Análise de Tukey para o ensaio de índice de vazios com nível de confiança de 95%: influência do tipo de traço

Idade	Combinações	Probabilidade	Significância
7 dias	Bar-SAP x Bar	2,00E-06	Sim
	Ref x Bar	9,92E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	2,34E-06	Sim
	Ref-SAP x Bar	1,92E-06	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	1,00E+00	Não
	Ref-SAP x Ref	2,25E-06	Sim
28 dias	Bar-SAP x Bar	0,00E+00	Sim
	Ref x Bar	9,48E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	0,00E+00	Sim
	Ref-SAP x Bar	3,68E-07	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	1,55E-04	Sim
	Ref-SAP x Ref	2,65E-07	Sim

Fonte: Elaboração própria, (2022).

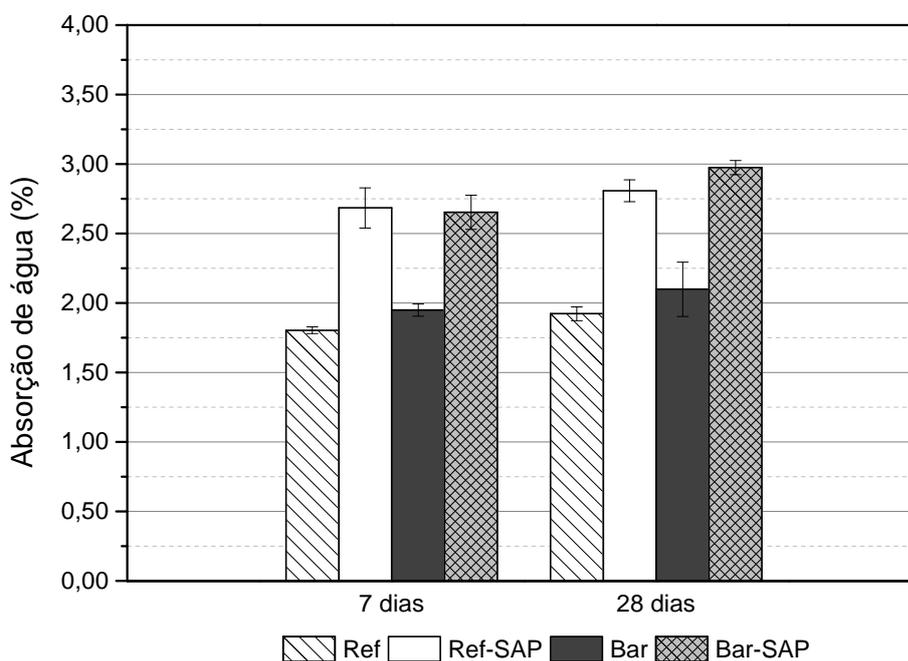
Já os dados obtidos para o ensaio realizado a 105 °C, apresentados no Apêndice A, revelaram um comportamento contraditório. Diferentemente do ensaio a 80 °C, os traços de referência com e sem SAP apresentaram um índice de vazios maior ou igual quando comparados aos seus respectivos traços com fibra. Conforme comenta Barros (2022), para temperaturas de até 80 °C, apenas a água livre é evaporada, para temperaturas acima de 80 °C a água capilar e a adsorvida começam a ser eliminadas, o que pode elevar o índice de vazios totais do concreto. Ainda, o derretimento da fibra pode ter ocorrido em toda a extensão do corpo de prova e, assim, preenchido os vazios no contorno da fibra, reduzindo a sua porosidade.

Na Figura 50 são apresentadas os valores médios para a absorção, estes seguem um comportamento semelhante ao do índice de vazios, apontando uma certa relação entre as propriedades. Contudo, percebe-se que o traço Bar, apesar de apresentar um aumento no índice de vazios de 7 para 28 dias, não elevou a taxa de absorção de água, conforme análise estatística evidenciada na Tabela 16, revelando que a relação entre os dois índices não é direta e nem linear. Os traços Bar-SAP e Ref, por outro lado, mantiveram o mesmo comportamento do ensaio anterior, com crescimento ao longo do processo de cura. O Ref-SAP manteve mesmo comportamento, sem evolução.

O SAP, por sua vez, elevou consideravelmente a absorção de água em todas as idades, Tabela 17. Desta forma, as maiores taxas de absorção são encontradas nos traços Bar-SAP e Ref-SAP. Contudo, verifica-se que o aumento foi mais significativo frente ao índice de vazios, indicando que o vazios deixado pelo SAP resultou em uma maior quantidade de poros totais (isolados e conectados), que resultou em um aumento na capacidade de absorção de água. Lyu *et al.* (2020) avaliaram a adição de SAP

de pequena granulometria em pavimentos de concreto, e observaram o aumento da porosidade da matriz. No entanto, concluíram que este aumento é acompanhado pela redução do tamanho médio dos poros e do tamanho crítico dos poros, o que tende a refinar o tamanho dos poros e melhorar a interconectividade. Yang *et al.* (2019b) ao avaliar a porosidade em argamassas auto adensáveis curadas com SAP observou o mesmo comportamento. Contudo, a porosidade e conectividade dos poros são variáveis dependentes da granulometria do polímero.

Figura 50 – Valores médios para o ensaio de absorção realizado a 80 °C



Fonte: Elaboração própria, (2022).

A fibra Barchip, estatisticamente, não afetou a absorção de água da mistura, conforme é mostrado na Tabela 17. De mesmo modo, quando adicionada de forma isolada, a fibra não altera as propriedades de porosidade da matriz. Todavia, quando utilizada em conjunto com o SAP, em idades posteriores, ocasiona um aumento no índice de vazios, contudo esse aumento não ocorre com a mesma intensidade na taxa de absorção de água, Tabela 16. Acredita-se que isso seja resultado do aumento do número de poros isolados, ocasionados principalmente pelo SAP, que acabam reduzindo a interconectividade e ainda, pela barreira física criada pela fibra, que dificulta a movimentação de água na matriz, reduzindo assim a capacidade de absorção de água do espécime.

Tabela 16 – Análise de Tukey para o ensaio de absorção com nível de confiança de 95%: influência do tempo de cura

Traço	Combinações	Probabilidade	Significância
Ref	7 dias x 28 dias	2,04E-02	Sim
Ref-SAP	7 dias x 28 dias	1,31E-01	Não
Bar	7 dias x 28 dias	2,63E-01	Não
Bar-SAP	7 dias x 28 dias	1,41E-02	Sim

Fonte: Elaboração própria, (2022).

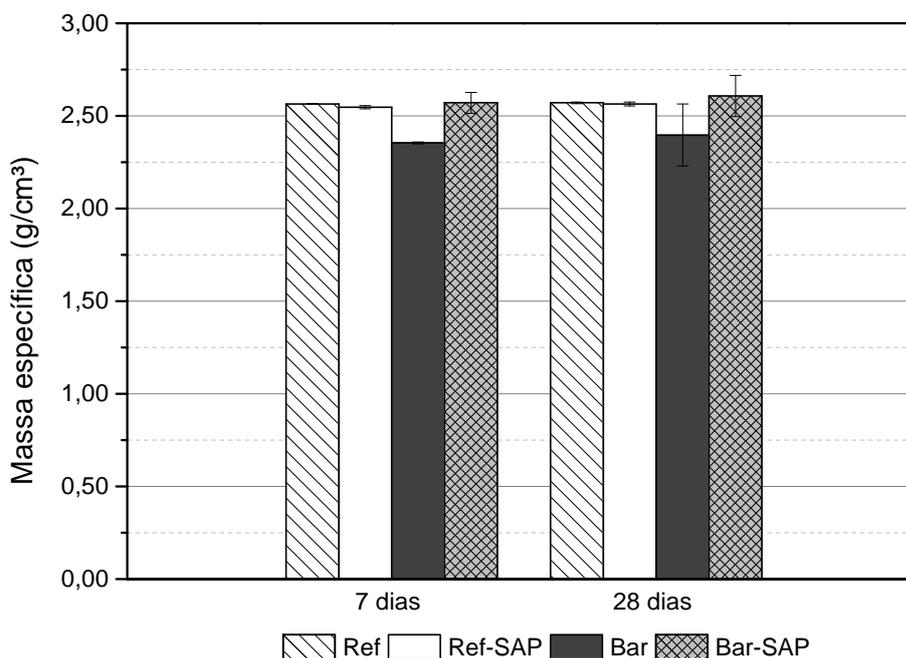
Tabela 17 – Análise de Tukey para o ensaio de absorção com nível de confiança de 95%: influência do tipo de traço

Idade	Combinações	Probabilidade	Significância
7 dias	Bar-SAP x Bar	3,27E-05	Sim
	Ref x Bar	2,32E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	7,94E-06	Sim
	Ref-SAP x Bar	2,46E-05	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	9,77E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	6,21E-06	Sim
28 dias	Bar-SAP x Bar	4,08E-05	Sim
	Ref x Bar	2,63E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	1,02E-05	Sim
	Ref-SAP x Bar	1,91E-04	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	3,04E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	3,75E-05	Sim

Fonte: Elaboração própria, (2022).

A Figura 51 mostra a massa específica e seus respectivos desvios-padrões, encontrados para os diferentes traços. Esta propriedade em específico, não sofre influência da fibra, do SAP ou da temperatura. Desta forma, apresenta uma massa específica média de 2,55 g/cm³, estando dentro dos valores estipulados para um concreto com fins estruturais.

Figura 51 – Valores médios para o ensaio de massa específica realizado a 80 °C



Fonte: Elaboração própria, (2022).

5.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

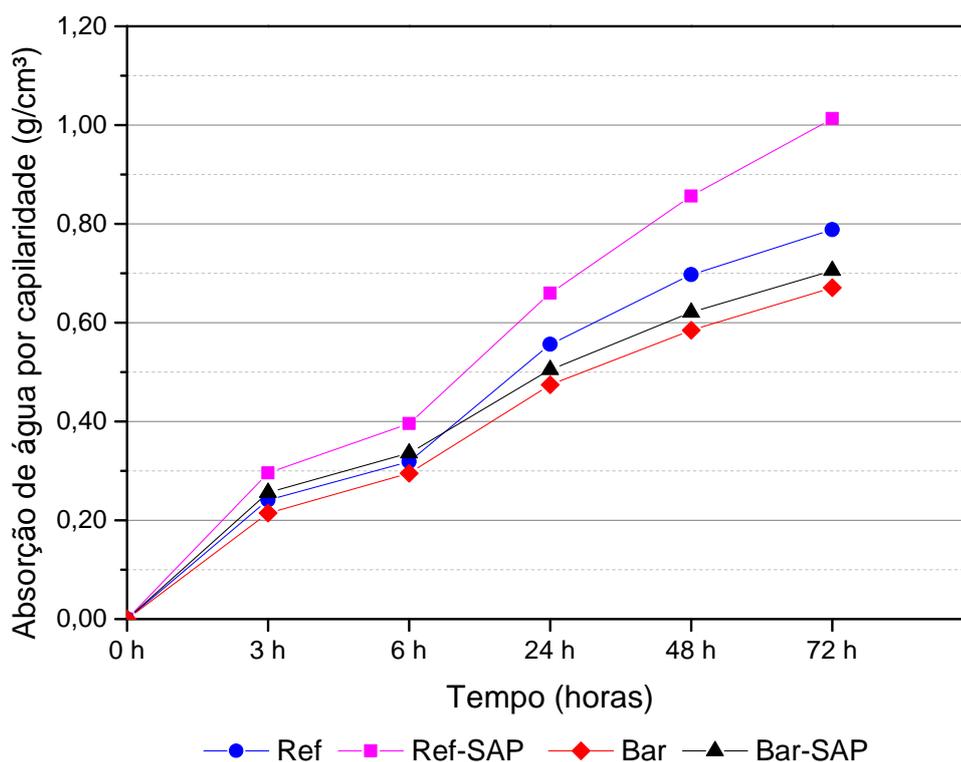
Na Figura 52 é apresentado o gráfico dos valores médios obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade em função do tempo, para os compósitos estudados. Os dados individuais encontram-se no Apêndice B. Neste ensaio, a absorção de água ocorre através dos poros capilares, onde a água ascende da base que permanece em contato com uma lamina d'água de 5 mm. Ainda, a Tabela 18 mostra a análise das médias, obtidas pelo teste de Tukey, onde é possível verificar a diferença estatística entre os diferentes traços estudados.

Ao observar as curvas presentes na Figura 52 percebe-se que todos os compósitos estudados apresentam uma taxa de absorção crescente, atingindo sua capilaridade máxima após 72 horas. Ademais, os traços contendo fibra apresentaram a tendência de uma menor capacidade de absorção quando comparado aos demais traços. Da mesma forma que no ensaio anterior, a fibra quando inserida de maneira individual, estatisticamente, não influenciou a absorção, o que pode ser observado na Tabela 18, onde o teste de Tukey, para uma confiabilidade de 95%, revelou que os traços Bar e Ref possuem a mesma capacidade de absorção. Acredita-se, portanto, que a presença da fibra, nestas condições, não possui a capacidade de modificar significativamente a estrutura de poros da matriz.

O SAP, por outro lado, elevou a absorção de água por capilaridade de ambos os traços, sendo seu efeito mais pronunciado para o traço Ref-SAP com uma diferença aproximada de 0,2 g/cm² quando comparada ao traço Ref. Porém, diferentemente do

que aconteceu no ensaio anterior, o traço Bar-SAP não é estatisticamente diferente do traço Bar, Tabela 18, ou seja, o SAP não teve efeito frente a absorção de água por capilaridade neste traço. Contudo, ao comparar os traços Ref-SAP e Bar-SAP, verifica-se um aumento na taxa de absorção do traço Ref-SAP, que pode estar associado a barreira física criada pela fibra, que afetou a interconectividade dos poros impedindo a ascensão da água.

Figura 52 – Valores médios para o ensaio de absorção de água por capilaridade



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Tabela 18 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traço, com nível de confiança de 95%

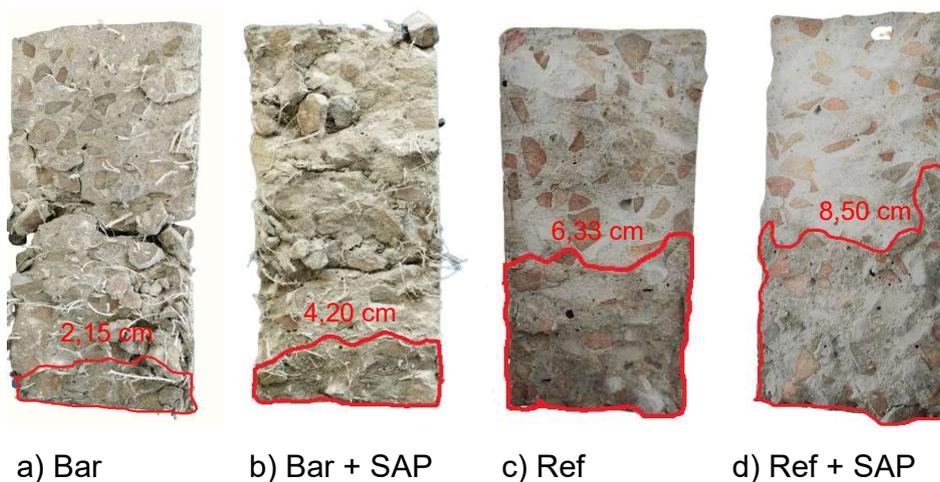
Combinações	Probabilidade	Significância
Bar-SAP x Bar	7,03E-01	Não
Ref x Bar	1,97E-01	Não
Ref x Bar-SAP	7,25E-01	Não
Ref-SAP x Bar	4,38E-04	Sim
Ref-SAP x Bar-SAP	2,50E-03	Sim
Ref-SAP x Ref	1,54E-02	Sím

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Na sequência ao ensaio de absorção de água por capilaridade, os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral, a fim de permitir a medição das alturas de penetração de água, Apêndice 4.3.4. Na Figura 53 é apresentada a média

obtida para as alturas máximas de penetração, no qual é possível correlacionar o diâmetro dos poros e a quantidade de água absorvida. Costa (2015) ressalta que as forças capilares aumentam com a diminuição do diâmetro dos poros, desta forma, poros maiores apresentam uma menor altura de sucção e maiores volumes absorvidos. Por sua vez, materiais com grandes quantidades de poros mais finos, podem apresentar elevadas alturas de penetração.

Figura 53 – Valores médios de penetração de água por capilaridade



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Ao correlacionar as curvas de absorção da Figura 52 com a Figura 53, percebe-se que o traço Ref-SAP apresenta a maior capacidade de absorção e maior altura de penetração da água. Desta forma, acredita-se que a adição de SAP tenha elevado o número de poros mais finos, quando comparado aos demais traços, e as forças capilares, que elevaram a altura de sucção de água. Foi comprovado por alguns trabalhos, tais como Lyu *et al.* (2020), Lyu *et al.* (2019), Yang *et al.* (2019b), que a presença do SAP afeta a porosidade da matriz. Contudo, o aumento da porosidade é acompanhado pela redução do tamanho médio dos poros e do tamanho crítico dos poros, o que tende a refinar o tamanho dos poros e aumentar a interconectividade.

Wang, Shah e Phuaksuk (2001) ressaltam que a adição de fibras aumenta, de fato, a quantidade de poros de maiores dimensões em comparação a concretos convencionais, o que reduz a pressão capilar. Segundo os autores, estes poros encontram-se na zona interfacial entre as fibras e a matriz de cimento. Isto explica o porquê dos traços Bar-SAP e Bar apresentarem uma pequena altura de sucção, devido provavelmente ao aumento do tamanho dos poros, que diminui a atuação da força capilar e a interconectividade entre os poros. Ademais, o traço Bar-SAP, por um lado, sofre um aumento no diâmetro dos poros causados pela fibra, e por outro, uma redução no diâmetro provocada pelo SAP, estas duas características podem ter se anulado gerando uma pequena taxa de absorção e altura de penetração.

5.4 RETRAÇÃO LIVRE (RETRAÇÃO TOTAL, RETRAÇÃO AUTÓGENA E RETRAÇÃO POR SECAGEM)

Nesta seção são apresentados os resultados de retração autógena, retração por secagem e retração total. Todas avaliam a retração livre do material, isto é, sem restrição de movimento. Vale ressaltar que os espécimes destinados à retração autógena receberam cura selada (sem troca de temperatura com o ambiente), enquanto os para retração total receberam cura em temperatura controlada. Assim, a retração autógena representa resultados de variação dimensional obtidos desde o estado fresco (retração plástica) até o estado endurecido, sendo, portanto, deformações sofridas principalmente pelas reações de hidratação. Por outro lado, a retração total do concreto nas condições estudadas (temperatura e umidade), representa a soma dos efeitos causados pela autodessecação (retração autógena) e pela troca de calor com o ambiente (retração por secagem). Para estudar o fenômeno de retração por secagem isoladamente, os dados de retração autógena foram subtraídos dos dados de retração total, obtendo-se assim a retração por secagem.

Na Figura 54 são apresentados os dados médios obtidos para a retração autógena, encontrados ao longo de 40 dias de ensaio. Enquanto, a Figura 55 mostra os valores estimados de retração por secagem. Já Figura 56 são apresentados os valores médios de retração total. Cada ponto no gráfico representa a média das medições de três espécimes, seus valores individuais são apresentados no Apêndice C. A análise estatística de todas as retrações foi realizada através do teste de Tukey com confiança de 95% e é apresentada na Tabela 19.

Ao analisar as linhas da Figura 54 verifica-se que em todos os casos, há uma tendência de evolução das deformações ao longo dos dias, com estabilização próxima aos 35 dias. O traço Bar e Ref apresentaram comportamento semelhante frente a retração autógena. Ambos apresentaram rápido crescimento em idades precoces, possivelmente devido a reduzida rigidez da matriz, que ainda não apresentava resistência para resistir aos esforços e a elevada taxa de autodessecação, resultante das rápidas reações de hidratação. Após aproximadamente 7 dias, a taxa de crescimento da retração é reduzida, revelando uma desaceleração no processo de hidratação.

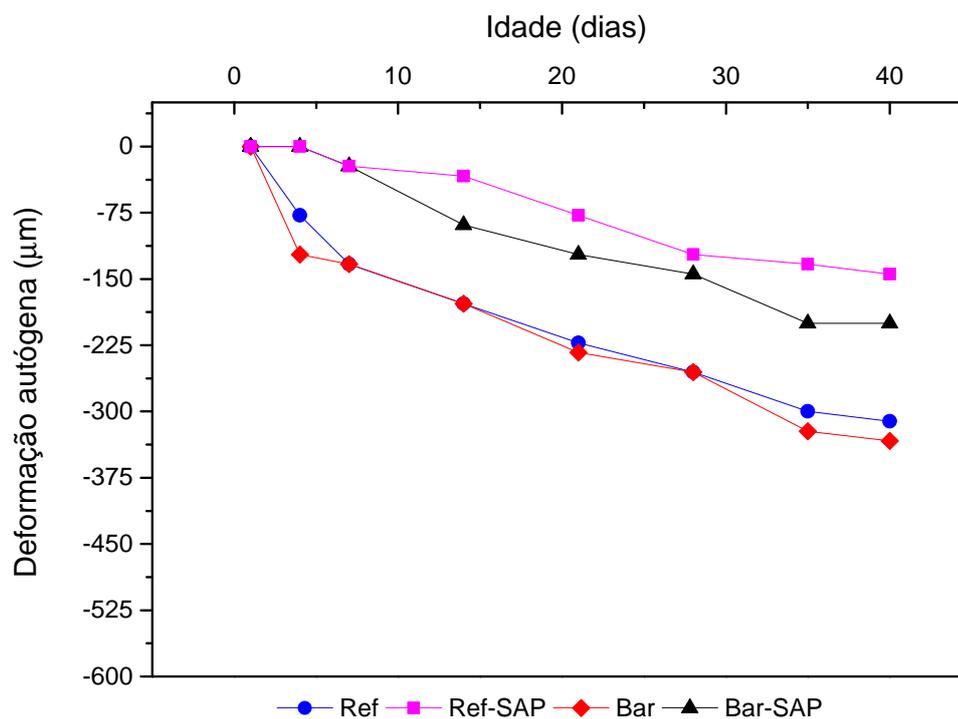
Com base nestas informações e nos dados estatísticos da Tabela 19, verifica-se que a presença da macrofibra Barchip não auxiliou, de forma significativa, a redução das deformações causadas pela retração autógena. Pelo contrário, há uma tendência da macrofibra aumentar as deformações por retração autógena. Tal fato, pode estar associado ao fato que fibras muito longas provocam uma distribuição desigual no concreto, gerando defeitos internos e uma distribuição desigual das tensões, propiciando o surgimento de fissuras. E ainda, o fato da fibra agir como um bloqueio para a água, pode ter impedido que a plena movimentação da água livre dentro do concreto, fazendo com que a água capilar fosse consumida para completar a hidratação e a retração

autógena gerada. O mesmo comportamento foi observado no traço Bar-SAP, onde a adição da fibra prejudicou o comportamento da matriz, quando comparada ao traço Ref-SAP.

Shen *et al.* (2018) encontraram resultados distintos ao avaliar a adição da fibra Barchip (l_f de 42 mm) no concreto que, mesmo em diferentes teores, levou a fibra levou à reduções na retração autógena. Shen *et al.* (2020c) ao avaliarem a adição de diferentes teores de fibra Barchip (l_f de 42 mm) e do SAP ao concreto, obtiveram os mesmos resultados. Os autores atribuíram esta redução a dois fatores: primeiro, a adição de fibra Barchip contribuiu para a distribuição uniforme do concreto e bloqueou os canais de movimentação da água, tornando-se uma barreira física que acabou por retardar e reduzir a perda de água para o ambiente, desta forma, os poros capilares permaneceram saturados por um maior período de tempo. Segundo, as ranhuras da fibra podem aumentar a força de aderência entre a pasta de cimento e as fibras, reduzindo a abertura de fissuras. Ainda atribuem um terceiro efeito, o aumento da quantidade de poros dilatados na matriz, que melhora o comportamento de exsudação da pasta. Ao reduzir a exsudação, um número maior de poros permanecem saturados, disponibilizando uma maior quantidade de água para hidratação, o que acabou por minimizar os efeitos da autodessecação. Contudo, devido ao menor comprimento da fibra, os problemas citados acima, causados pelo uso de fibras muito longas, podem ter sido evitados e assim, seu efeito na mitigação da retração foi benéfico.

O SAP, por sua vez, reduziu significativamente a retração autógena, conforme evidencia a Tabela 19, principalmente em idades precoces. Os traços Ref-SAP e Bar-SAP, até os 5 dias, não apresentaram retração. Somente após os 7 dias houve um crescimento considerável. Isto, é um indicativo que grande parte da água de cura interna é liberada em um período de até 7 dias. Depois desta idade, o fornecimento de água decai devido a maior dificuldade para liberação de água pelo SAP, iniciando, assim, o fenômeno da autodessecação. No Bar-SAP, a cura interna conseguiu compensar parte dos possíveis defeitos introduzidos pela fibra, contudo, ainda apresentou uma maior taxa de retração autógena que o traço Ref-SAP ao longo dos dias. Resultados semelhantes foram encontrados por Yang *et al.* (2019a), os quais observaram que o SAP com tamanhos de partículas de 120-830 μm , iniciam o processo de liberação de água antes de 3 dias. Contudo, a taxa de liberação de água começa a diminuir aos 6 dias e finaliza este processo aos 10 dias. Lyu *et al.* (2020), também observou que a liberação de água do SAP é iniciada antes dos 7 dias.

Figura 54 – Retração autógena



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Ao comparar os resultados em maiores idades, quando o SAP provavelmente já encerrou seu efeito de cura interna, as reduções médias são de aproximadamente 53,6% ao comparar os traços Ref e Ref-SAP e de 40% para Bar e Bar-SAP. Em idades precoces o SAP libera água para saturar os poros capilares e retardar a autodessecação. Dois fenômenos podem surgir em decorrência desse efeito: primeiro, pode ocorrer uma intensificação do processo de hidratação, e, por consequência, uma intensificação do processo de cura, que fornece ao concreto capacidade resistente nas idades iniciais; e segundo, as microfissuras iniciais, ao serem minimizadas, diminuem a possibilidade de propagação em idades posteriores. Tais fatos, podem estar relacionados ao efeito benéfico do SAP mesmo em idades posteriores onde a cura interna já foi cessada.

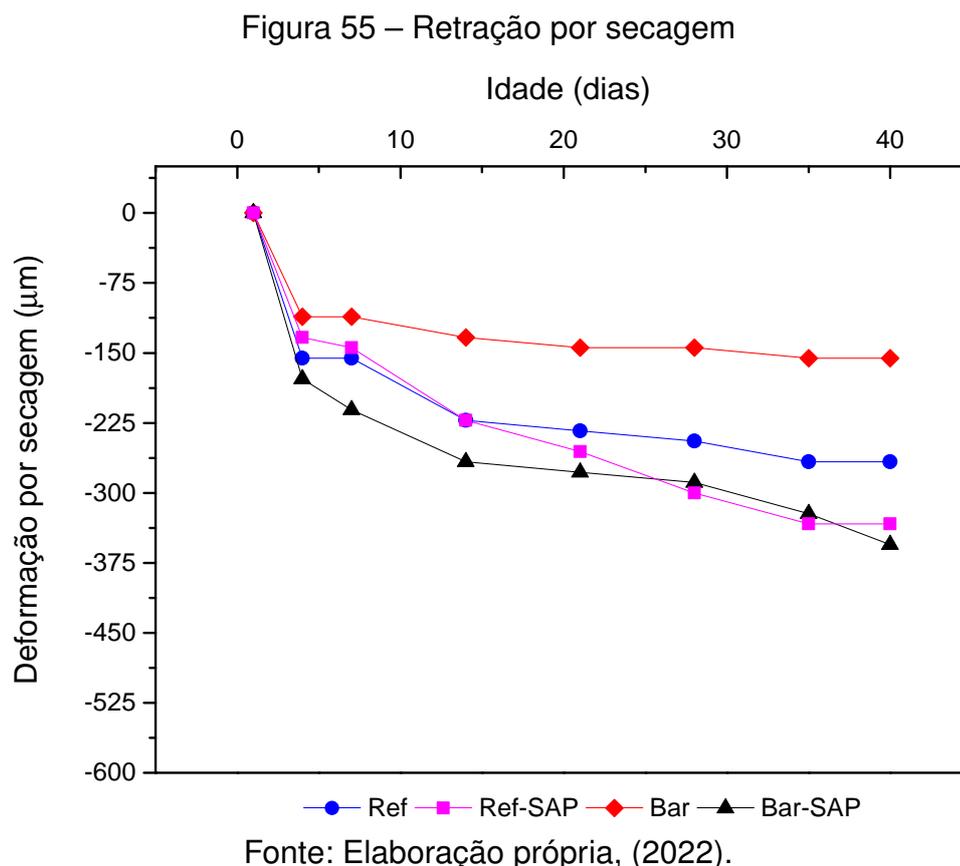
Ao analisar os dados da Figura 55 percebe-se que para todos os traços, há uma rápida evolução das deformações por secagem nos primeiros 4 dias, devido a grande quantidade de água livre disponível na matriz, que é consumida pelo ambiente através da evaporação. Após este período, o processo continua a ocorrer, no entanto, de forma mais lenta. O traço Bar apresenta as menores taxa de retração por secagem, com uma estabilização logo aos 7 dias. De maneira análoga, o traço Ref, também se estabiliza em idades precoces, esta porém ocorre aos 14 dias. Os demais traços continuam a evoluir até os 40 dias.

Como já esperado, a presença do SAP elevou as deformações de retração por secagem, o que decorre do aumento da quantidade de água disponível dentro da matriz e do aumento na conectividade dos poros. Resultados diferentes foram encontrados

por Yang *et al.* (2019b) que observaram melhoras significativas na redução da retração autógena e na retração por secagem, onde ao adicionar de 0,4% em peso se SAP, obtiveram uma redução de 12,6% e 15,5%, respectivamente. Yang *et al.* (2019a) ao avaliar pavimentos de concreto observou o mesmo comportamento. Contudo, a retração por secagem pode ser associada ao processo de dessorção do SAP e das condições ambientais em que o concreto é exposto.

De acordo com WU *et al.* (2017) e SILVA (2007), o consumo de água necessário para a hidratação do cimento é responsável pela retração autógena. Assim, quando a matriz apresenta água livre, ou seja, água em excesso remanescente durante o processo de hidratação, a retração autógena é reduzida. Por outro lado, essa água livre após a formação dos produtos de hidratação é evaporada para a superfície, causando a retração por secagem (NEVILLE, 2015). Com o uso do SAP, nesta pesquisa, observou-se que ao introduzir água na matriz, através da cura interna, foi possível reduzir a retração autógena, a retração total, mas não a retração por secagem. Isto, pode estar relacionado às condições ambientais que os espécimes foram expostos. A taxa de evaporação da água liberada pelo SAP pode ter sido mais alta que o consumo da matriz, devido as condições de temperatura e umidade estudadas. Além disso, ao aumentar a conectividade dos poros, o SAP acelera a evaporação da água para o ambiente externo, prejudicando o efeito da cura interna principalmente na retração por secagem.

A adição da fibra Barchip, no entanto, diferentemente do que aconteceu na retração autógena, reduziu consideravelmente a retração por secagem, conforme evidenciado na Tabela 19. A fibra ao agir como ponte de transferência de tensões, redistribuiu os esforços, provocados pela retração, e reduz o tamanho das microfissuras, minimizando a retração por secagem. Ainda, ao agir como uma barreira física dificultou a movimentação da água presente no interior do concreto, levando a reduções na taxa de perda de água por evaporação para a superfície. A combinação da fibra e do SAP, não foi benéfica, apresentando a maior taxa de deformação em todas as idades. Desta forma, verifica-se que a fibra não consegue compensar os efeitos na retração, neste caso, devido provavelmente a má distribuição interna da fibra juntamente com o SAP, que alteram de forma negativa a estrutura de poros do concreto. Acredita-se que os grãos de SAP próximos à fibra, ao liberarem água, resultaram em vazios que podem comprometer a ancoragem da fibra-matriz.

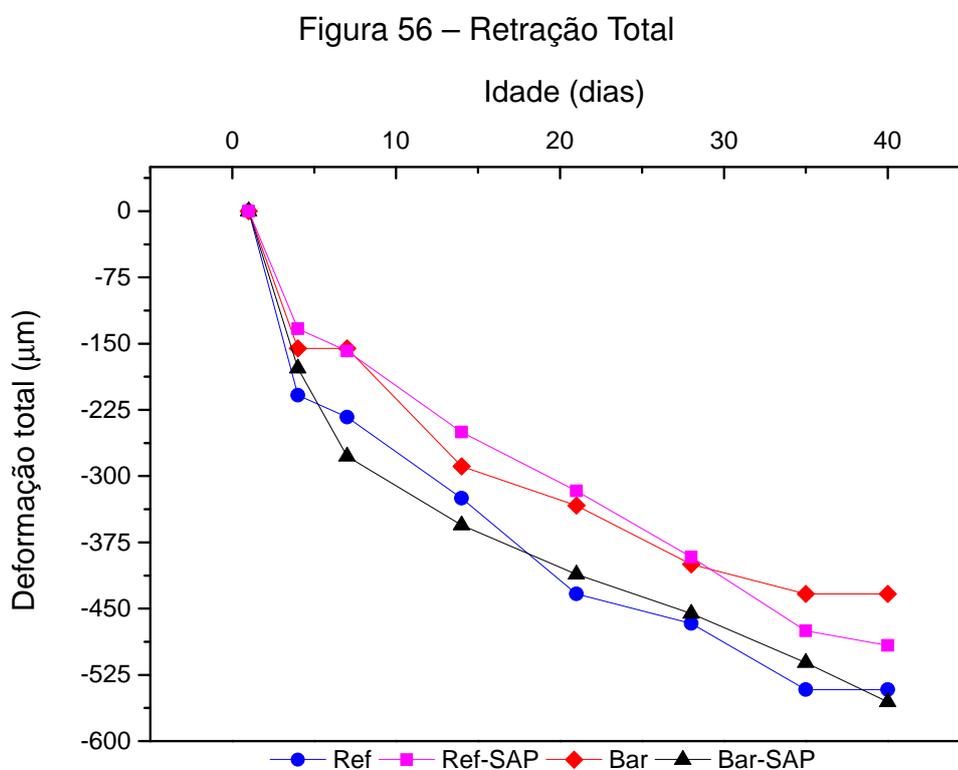


A retração total, Figura 56, refere-se a soma dos efeitos da retração autógena e da retração por secagem. Ao analisar o comportamento, percebe-se que há uma tendência do crescimento das deformações totais ser linear ao longo dos dias, onde as máximas deformações são atingidas aos 40 dias. Observa-se também, que de 0 a 4 dias há um crescimento acelerado da retração total, em decorrência da maior quantidade de água livre disponível na mistura, que pode intensificar as deformações por secagem. Com a continuação do processo de hidratação, a quantidade de água livre começa a diminuir e o processo de evaporação, apesar de continuar a ocorrer, acontece de forma mais lenta, freando a evolução da retração por secagem. Assim, as deformações tendem a se estabilizar aos 35 dias, em decorrência do fim do processo de hidratação para todos os traços, exceto para o Bar-SAP, que não apresenta o mesmo fenômeno.

As deformações causadas pela retração autógena e pela retração por secagem atingiram valores próximos, evidenciado que a matriz estudada sofre efeitos semelhantes do processo de autodessecação e de secagem. O SAP ao agir liberando água para a hidratação reduziu a retração autógena, o que gerou uma melhora significativa no comportamento frente a retração total, sendo seu efeito mais significativo para o traço Ref-SAP, Tabela 19. Ao comparar os traços Ref e Ref-SAP, verifica-se, que houve uma redução na retração e que a diferença entre as deformações de ambos os traços se manteve constante até os 28 dias. Depois desta data, a diferença foi reduzida,

devido, possivelmente, ao fim do processo de cura interna e intensificação da retração autógena e por secagem.

A fibra Barchip, por sua vez, revelou um efeito positivo na retração total, quando adicionada de forma isolada. Estatisticamente, os traços Ref-SAP e Bar apresentam um comportamento semelhante, sendo ambos, os traços com menor retração. Como pode ser visto na Figura 56 aos 40 dias, a diferença entre o traço Bar e Ref-SAP é de apenas 13%. Logo, acredita-se que, nas condições deste estudo, o SAP e a Barchip possuem capacidade semelhantes de mitigar a retração total, ao reduzir a retração autógena e por secagem, respectivamente. Contudo, verifica-se que há uma tendência do Bar superar o Ref-SAP em idades avançadas, devido possivelmente ao SAP já ter liberado toda a sua água e não poder mais preencher os poros capilares, enquanto a retração por secagem continua a ocorrer. Já a fibra ao atuar como uma barreira física, dificulta a movimentação da água e impede parte da evaporação, além de proporcionar menor fissuração interna devido a sua ancoragem com a matriz. O traço Bar-SAP, apesar de apresentar um comportamento contrastante ao Bar e Ref-SAP, (Tabela 19), apresentando um aumento nas deformações totais se igualando ao Ref. Conforme apontado anteriormente, acredita-se que isto se deva a problemas na matriz (maior conectividade dos poros) devido ao uso combinado dos materiais.



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Acredita-se que o efeito do polímero superabsorvente seja mais significativo nas idades precoces (5 dias), pois o traço Ref-SAP praticamente não apresentou

retração autógena. De maneira semelhante, também nesta idade, o traço Ref-SAP apresentou uma pequena taxa de retração total, revelando que nesta idade os poros encontram-se parcialmente saturados, não sofrendo, portanto, deformações decorrentes do processo de autodessecação e secagem. Tais dados corroboram com os resultados encontrados para o índice de vazios e absorção, evidenciando que grande parte da água de cura interna é liberada em idades precoces. De fato, verifica-se que o polímero superabsorvente, atua como agente de cura interna reduzindo a retração autógena e a retração total, embora prejudique a retração por secagem. Assim, seu uso passa a ser recomendado a traços com baixa relação a/c e pequenas taxas de perda de água por evaporação.

A fibra Barchip, assim como o SAP, pode ser utilizada como agente mitigador da retração, uma vez que controla a retração por secagem, minimizando a retração total. Presume-se, portanto, que traços com relações a/c mais elevadas e com altas taxa de evaporação, como estruturas de placas, podem ter a retração total efetivamente neutralizada pela adição da macrofibra Barchip. O uso combinado dos métodos, no entanto, não gerou nenhum efeito positivo na retração livre.

Tabela 19 – Análise pelo teste de Tukey entre os diferentes traços para as deformações de retração com nível de confiança de 95%

Tipo de retração	Combinações	Probabilidade	Significância
Total	Bar-SAP x Bar	1,48E-01	Não
	Ref x Bar	6,50E-03	Sim
	Ref x Bar-SAP	6,46E-01	Não
	Ref-SAP x Bar	9,86E-01	Não
	Ref-SAP x Bar-SAP	6,78E-02	Não
	Ref-SAP x Ref	2,03E-03	Sim
Autógena	Bar-SAP x Bar	0,00E+00	Sim
	Ref x Bar	7,16E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	1,53E-06	Sim
	Ref-SAP x Bar	0,00E+00	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	1,93E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	0,00E+00	Sim
Por secagem	Bar-SAP x Bar	0,00E+00	Sim
	Ref x Bar	6,16E-08	Sim
	Ref x Bar-SAP	1,82E-02	Sim
	Ref-SAP x Bar	0,00E+00	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	3,89E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	5,15E-01	Não

Fonte: Elaboração própria (2022).

5.5 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

No gráfico de colunas da Figura 57 são apresentados os valores médios de resistência à compressão obtidos para os traços em análise, bem como o desvio padrão dos dados para as idades de 7, 14 e 28 dias, enquanto os dados individuais são apresentados no Apêndice D. Já na Figura 58 é apresentada uma combinação dos dados de resistência à compressão em função do índice de vazios para a idade de 28 dias. A Tabela 20 mostra a probabilidade e a significância obtidos na análise de comparação das médias (Tukey) para as idades dentro do mesmo traço, enquanto na Tabela 21 são apresentadas para as combinações para os diferentes traços.

Ao observar os dados da Figura 57 percebe-se que há um tendência de crescimento da resistência ao longo do tempo, que ocorre devido a continuidade do processo de hidratação, onde a máxima resistência é atingida aos 28 dias para todos os traços estudados. O traço Bar, visualmente é o que apresenta a maior taxa de crescimento e o que apresenta a maior capacidade resistente nas idades finais. A média de resistência manteve-se estável dos 14 dias aos 28 dias, de modo semelhante ao traço Ref-SAP, conforme evidenciado estatisticamente na Tabela 20. Contudo, percebe-se que a dosagem Bar-SAP não apresenta variação significativa com o passar dos dias, ou seja, estatisticamente aos 7 dias a mistura já apresentava sua resistência final. Tal fato se deve a potencial melhora do processo de hidratação provocada pelo SAP e ao efeito de ponte de transferência de tensões proporcionado pela fibra. Este efeito é benéfico, uma vez que logo nas primeiras idades o concreto já apresenta resistência para impedir a fissuração precoce causada pela retração.

Figura 57 – Valores médios para a resistência à compressão

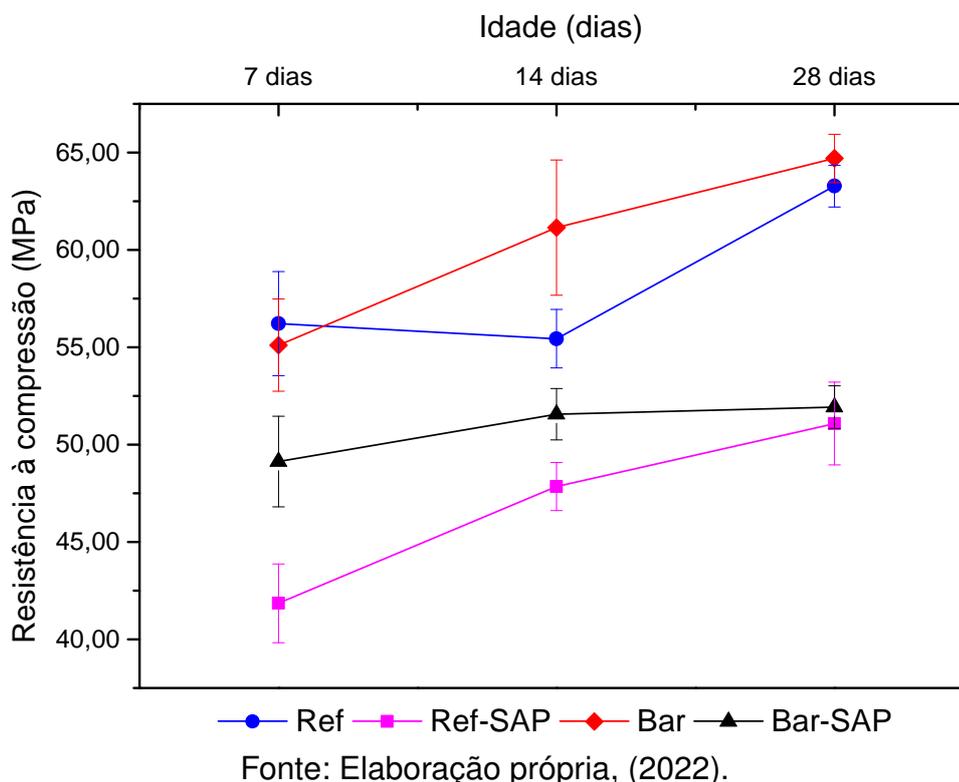


Tabela 20 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%

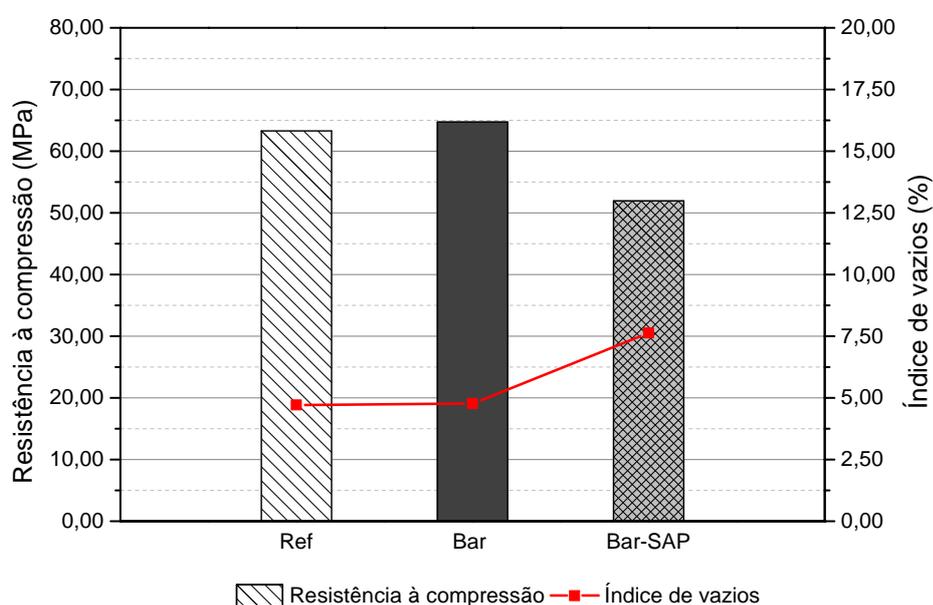
Traço	Combinações	Probabilidade	Significância
Ref	7 dias x 14 dias	8,35E-01	Não
	7 dias x 28 dias	1,20E-03	Sim
	14 dias x 28 dias	5,90E-04	Sim
Ref-SAP	7 dias x 14 dias	3,30E-03	Sim
	7 dias x 28 dias	1,50E-04	Sim
	14 dias x 28 dias	7,94E-02	Não
Bar	7 dias x 14 dias	1,99E-02	Sim
	7 dias x 28 dias	1,20E-03	Sim
	14 dias x 28 dias	1,71E-01	Não
Bar-SAP	7 dias x 14 dias	1,54E-01	Não
	7 dias x 28 dias	9,63E-02	Não
	14 dias x 28 dias	9,48E-01	Não

Fonte: Elaboração própria, (2022).

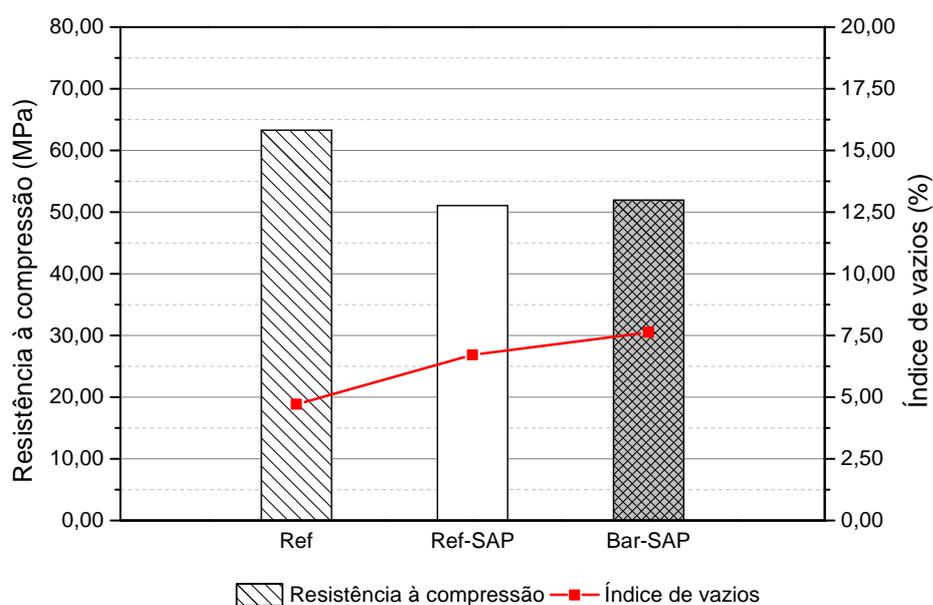
Percebeu-se, também, que o incremento do polímero superabsorvente leva à quedas significativas na resistência à compressão em todas as idades e em ambos os traços, como pode ser visto na Tabela 21. Para o traço Bar-SAP, aos 28 dias, a redução chegou à 19,7% quando comparada ao Bar, enquanto para o traço Ref-SAP esta redução é de 19,3% em relação à sua Referência. Ademais, ao analisar os dados da Figura 58 percebe-se que aos 28 dias, a redução da resistência é acompanhada

do aumento no índice de vazios nos traços Ref e Ref-SAP. Resultados semelhantes foram encontrados por Shen *et al.* (2016), Yang *et al.* (2019b), Lyu *et al.* (2019) e Qin *et al.* (2020) que atribuíram a redução na resistência à compressão ao aumento da porosidade, que fragilizam a matriz cimentícia. De acordo com Hasholt, Jespersen e Jensen (2010), em certas condições, o aumento da resistência devido ao incremento do grau de hidratação não é suficiente para contrabalancear a redução da resistência devido aos vazios resultante ao volume de polímero adicionado.

Figura 58 – Efeito da macrofibra Barchip e do SAP na resistência à compressão e a relação com o índice de vazios aos 28 dias



(a) Efeito da macrofibra Barchip



(b) Efeito do SAP

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Quanto ao uso da fibra, esta não foi capaz de elevar consideravelmente a resistência da matriz, como mostra a Tabela 21. Estatisticamente somente aos 14 dias a fibra superou o traço Ref. Aos 28 dias é possível observar na Figura 58 que não houve variação na resistência à compressão e nem no índice de vazios ao comparar os traços Ref e Bar. Resultados semelhantes foram encontrados por Behfarnia e Behravan (2014) em que a presença da fibra Barchip não afetou consideravelmente a resistência à compressão. Já Camille *et al.* (2021) afirmaram que quando adicionado em teores acima de 1,0%, a fibra Barchip começa a interferir negativamente na resistência à compressão do concreto. Os autores justificam este efeito pelo mecanismo do *ball up*, em que as fibras longas e em altas frações volumétricas reduzem a compactação do concreto, elevando potencialmente os vazios e assim, reduzindo a resistência à compressão e trabalhabilidade da mistura.

Apesar de não elevar o desempenho à compressão, conforme análise apresentada na Tabela 21, a presença da fibra no traço contendo SAP conseguiu compensar parte da perda de resistência ocasionada pelo SAP, principalmente em idades precoces, onde as partículas de SAP ainda encontram-se saturadas com água, gerando pressões internas multidirecionais quando submetidos a esforços de compressão, que acabam reduzindo a resistência à compressão. Analisando a Figura 58, percebe-se que praticamente não há diferença entre o traço Ref-SAP e Bar-SAP quanto à resistência, porém há um aumento de quase 1% no índice de vazios, o que comprova o efeito positivo da fibra. Na Figura 59, pode-se observar que o incremento da fibra elevou a tenacidade da matriz, que ao absorver mais energia passou de uma ruptura frágil, onde o espécime sem fibra se partiu em pedaços, revelando sua ruptura no formato cônico, para uma ruptura dúctil, no qual o espécime com fibra manteve-se íntegro, com apenas fissuras no formato cônico.

Tabela 21 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traços para nível de confiança de 95%

Idade	Combinações	Probabilidade	Significância
7 dias	Bar-SAP x Bar	1,71E-02	Sim
	Ref x Bar	9,10E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	5,40E-03	Sim
	Ref-SAP x Bar	2,07E-05	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	4,41E-03	Sim
	Ref-SAP x Ref	9,57E-06	Sim
14 dias	Bar-SAP x Bar	1,56E-04	Sim
	Ref x Bar	1,07E-02	Sim
	Ref x Bar-SAP	9,06E-02	Não
	Ref-SAP x Bar	8,54E-06	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	1,08E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	1,23E-03	Sim
28 dias	Bar-SAP x Bar	3,99E-08	Sim
	Ref x Bar	5,32E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	4,86E-07	Sim
	Ref-SAP x Bar	0,00E+00	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	8,41E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	1,49E-07	Sim

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Figura 59 – Ruptura no formato cônico para espécimes sem fibra (esquerda) e com fibra (direita)



Fonte: Elaboração própria, (2022).

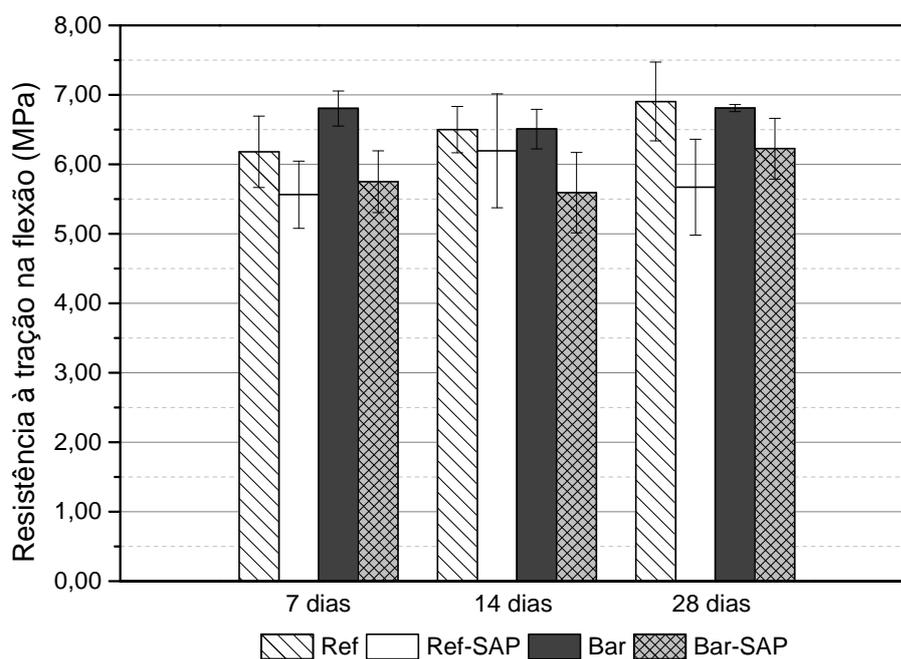
5.6 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Na Figura 60 é apresentado um gráfico de colunas com os valores médios de resistência à tração na flexão, bem como, os desvios padrões para cada traço estudado nas idades de 7, 14 e 28 dias. Além disso, na Tabela 20 e na Tabela 23 são apresentados os dados estatísticos obtidos pelo teste de Tukey com um nível de confiança de 95%

para a comparação para as diferentes idades e traços, respectivamente. Na Figura 62 é apresentado os gráficos de força *versus* deslocamento para todos os traços estudados, enquanto na Figura 63 são apresentados os dados de tensão residual média, obtidos para os traços contendo fibra. Ademais no Apêndice E são apresentados os dados individualmente.

Percebe-se, ao analisar as barras da Figura 60, que não há crescimento da resistência à tração na flexão ao longo dos dias, revelando que a idade de cura não é capaz de influenciar esta propriedade, o que pode ser comprovado pelo teste de Tukey apresentado na Tabela 22. Porém, há uma leve tendência de que idades avançadas os traços apresentem uma maior capacidade resistente, exceto para o traço Ref-SAP que aos 28 dias apresentou uma menor resistência quando comparada as outras idades. A dosagem Bar-SAP, no entanto, não apresentou a mesma tendência do Ref-SAP. Aos 28 dias a resistência à tração na flexão do traço Bar-SAP atinge o seu valor máximo, indicando uma possível atuação da fibra como ponte de transferência de tensões que acabou minimizando o efeito do SAP.

Figura 60 – Valores médios obtidos para o ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Ainda, o teste de Tukey apresentado Tabela 23 revela que a fibra não afeta significativamente a resistência à tração na flexão. De forma semelhante, Camille *et al.* (2021) encontraram em seus estudos, que a adição da fibra barchip ($\phi= 48$ mm e $\phi= 58$ mm) em diferentes teores, não foi capaz de influenciar de forma significativa o pico de resistência à flexão no estado pré-fissuração. Porém, há uma predisposição da fibra Barchip afetar esta propriedade de forma positiva, principalmente, aos 7 dias, quando o concreto ainda está em fase de endurecimento e não apresenta sua máxima resistência.

Neste momento, a fibra pode transferir as tensões e elevar a capacidade de suporte do compósito. Com o passar dos dias, a matriz atinge seu máximo desempenho e a atuação da fibra tem seu efeito minimizado, devido a elevada rigidez e resistência da matriz, que basicamente controla o comportamento do compósito.

A adição de SAP, por sua vez, também não afetou significativamente a resistência à tração na flexão para ambos os traços, conforme evidencia a Tabela 23, mesmo elevando o índice de vazios. De modo oposto, Qin *et al.* (2020) ao avaliar o efeito do SAP em pavimentos de concreto, verificou que a adição pode levar a um aumento deste da resistência à tração na flexão. Segundo os autores, o SAP, ao disponibilizar água por um maior período melhora a zona de transição entre a matriz e o agregado, e ainda, em idades precoces, os poros remanescentes formados pelo SAP podem ser preenchidos por uma reação tardia. Desta forma, há um aumento na resistência, que cresce com o aumento na dosagem. Yang *et al.* (2019b), por sua vez, avaliando argamassas autoadensáveis verificou uma redução da resistência à tração na flexão e na compressão, a qual foi atribuída ao poros grandes resultantes da decomposição do SAP.

Apesar da resistência à tração na flexão, se revelar uma propriedade que não sofre influência da aplicação da cura, da adição de fibra e nem do tempo de cura, frente a capacidade resistente, a presença da fibra altera o modo de ruptura dos espécimes. Na Figura 61 percebe-se que os todos os traços exibiram ruptura com apenas uma fissura no terço central. Porém, os traços contendo fibra não apresentaram a divisão do corpo de prova em duas metades, revelando que a fibra age como uma ponte de transferência de tensões, "costurando" as fissuras e fornecendo resistência residual ao compósito.

Figura 61 – Modo de ruptura dos espécimes durante o ensaio de tração na flexão; acima espécime com fibra e abaixo sem fibra



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Tabela 22 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%

Traço	Combinações	Probabilidade	Significância
Ref	7 dias x 14 dias	5,47E-01	Não
	7 dias x 28 dias	5,70E-02	Não
	14 dias x 28 dias	2,84E-01	Não
Ref-SAP	7 dias x 14 dias	3,69E-01	Não
	7 dias x 28 dias	9,61E-01	Não
	14 dias x 28 dias	5,06E-01	Não
Bar	7 dias x 14 dias	4,18E-01	Não
	7 dias x 28 dias	5,27E-01	Não
	14 dias x 28 dias	8,60E-02	Não
Bar-SAP	7 dias x 14 dias	7,99E-01	Não
	7 dias x 28 dias	6,28E-01	Não
	14 dias x 28 dias	2,98E-01	Não

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Poorsaheli *et al.* (2019), avaliaram em seu estudo o efeito da dosagem da fibra Barchip (54 mm de comprimento) na resistência à flexão do concreto. Os resultados mostram que ao aumentar a quantidade de fibras em mais de 0,33% em relação ao volume de concreto, ocorre uma melhora significativa na resistência. Segundo os autores, a razão é devido ao efeito de ponte da fibra na seção da trinca e, como resultado, evita-se a extensão da trinca. Uma vez que as fibras são distribuídas aleatoriamente no concreto, elas podem evitar qualquer propagação e extensão de fissuras nas etapas iniciais de fissuração em qualquer direção. A ponte de fissura aumenta a demanda de energia para que a fissura se propague e, conseqüentemente, aumenta a carga, a tenacidade, a absorção de energia e altera o comportamento frágil do concreto de falha súbita para comportamento dúctil e falha plástica (PAKRAVAN; LATIFI; JAMSHIDI, 2017).

Tabela 23 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%

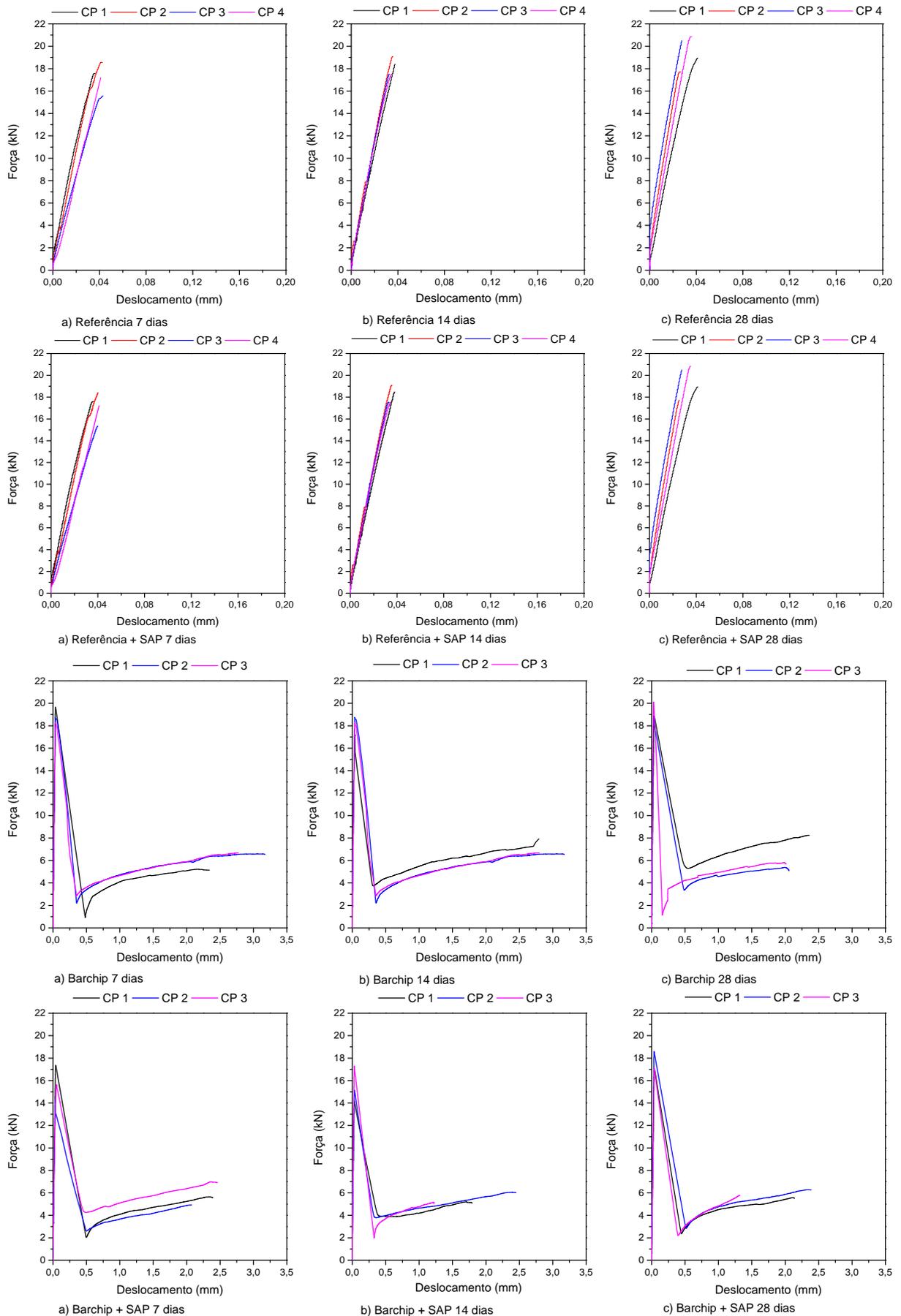
Idade	Combinações	Probabilidade	Significância
7 dias	Bar-SAP x Bar	6,98E-02	Não
	Ref x Bar	3,58E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	6,38E-01	Não
	Ref-SAP x Bar	3,37E-02	Sim
	Ref-SAP x Bar-SAP	9,52E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	3,70E-01	Não
14 dias	Bar-SAP x Bar	2,26E-01	Não
	Ref x Bar	1,00E+00	Não
	Ref x Bar-SAP	2,59E-01	Não
	Ref-SAP x Bar	8,59E-01	Não
	Ref-SAP x Bar-SAP	5,69E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	9,02E-01	Não
28 dias	Bar-SAP x Bar	1,00E+00	Não
	Ref x Bar	2,61E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	2,81E-01	Não
	Ref-SAP x Bar	6,32E-01	Não
	Ref-SAP x Bar-SAP	6,63E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	8,58E-01	Não

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Observando os gráficos da Figura 62 é notável que, em todos os casos, até o momento da ruptura o deslocamento é extremamente baixo, revelando a elevada rigidez da matriz. De fato, observa-se que os corpos de prova de concreto sem fibra sofreram uma ruptura súbita e drástica, caracterizando uma perda completa da capacidade de suporte após atingir o pico de carga, o que enfatiza o comportamento frágil do concreto. Já o concreto fibroso passou a apresentar, mesmo após a ruptura, uma pequena capacidade de suporte, fornecida pela ponte de transferência de tensões proporcionada pela fibra, demonstrando que a presença da macrofibra Barchip, apesar de não elevar consideravelmente a resistência à tração na flexão foi capaz de modificar o comportamento da matriz, que passou de frágil para pseudo-dúctil. Acredita-se que o volume de fibra utilizado nesta pesquisa está abaixo do volume crítico, por isso não foram observadas melhoras significativas no desempenho mecânico.

Camille *et al.* (2021) observaram em seu estudo um comportamento semelhante aos resultados encontrados neste estudo. A presença da fibra, em adições que variaram de 0 a 2,0%, proporcionaram ao concreto um comportamento não frágil, com capacidade resistente após a fissuração. Porém, ao utilizar elevadas dosagens de adições (1,5 e 2,0%) o comportamento do compósito passa a ser de *strain hardening*, onde a tensão pós-fissuração atinge valores acima do pico de tensão no estado pré-fissuração. No geral, a macrofibra Barchip foi capaz de aumentar a ductilidade do concreto, ao mesmo tempo em que supria o início e a propagação de fissuras.

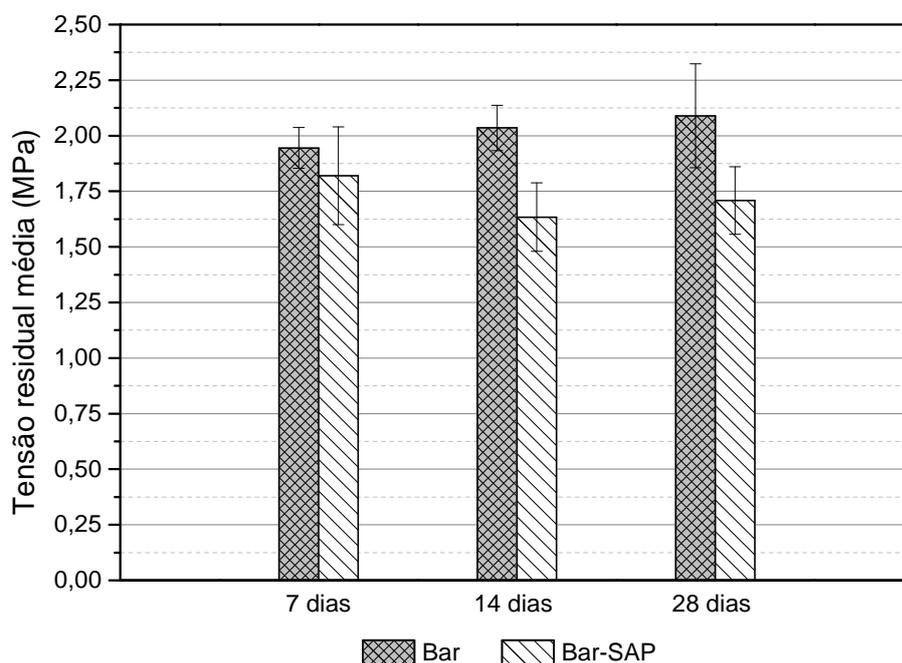
Figura 62 – Comportamento de força versus deslocamento



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Na Figura 63 são apresentados os dados de tensão residual média obtida para os traços com adição de fibra. Pode-se perceber que o traço Bar apresentou uma maior taxa de tensão, que cresceu linearmente com o processo de cura. Já o traço Bar-SAP, além de exibir uma menor capacidade resistente, revelou que em maiores idades há um declínio desta propriedade, devido provavelmente ao efeito negativo do aumento da porosidade causada pelo polímero e que não pode ser compensado pela fibra Barchip no teor de 0,5%.

Figura 63 – Tensão residual média encontrada para os traços com adição de macrofibra



Fonte: Elaboração própria, (2022).

5.7 MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO E DINÂMICO

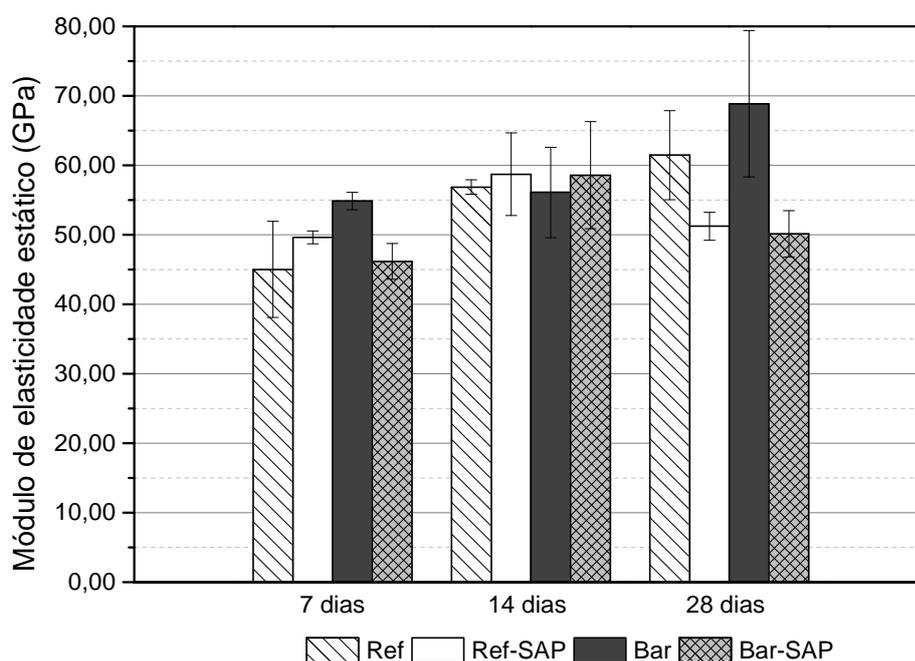
Na Figura 64 são apresentados os valores médios para o ensaio de módulo de elasticidade realizados para os diferentes traços de interesse. Enquanto, na Figura 62 são apresentados os gráficos de força *versus* deslocamento para os diferentes traços estudados. Vale ressaltar que este ensaio foi realizado nas idades de 7, 14 e 28 dias, com a intenção de avaliar se a adição do polímero superabsorvente e da macrofibra Barchip sofre influência da idade de cura frente ao módulo de elasticidade. Já na Tabela 25 e na Tabela 24 são apresentados os dados estatísticos obtidos pelo teste de Tukey com um nível de confiança de 95%.

Analisando os dados da Figura 64 é possível perceber que há uma grande variação no desvio padrão para todos os traços analisados, que decorrem principalmente da suscetibilidade de erros fornecidos pelo ensaio. Ainda, observa-se que os traços Bar e Ref apresentam uma tendência de crescimento ao longo do processo de

cura, enquanto os demais traços evoluem até 14 dias e depois regridem. A evolução no módulo de elasticidade é uma propriedade esperada, uma vez que a evolução do processo de hidratação aumenta a quantidade de C-S-H, fornecendo resistência e rigidez a matriz, que por consequência eleva o módulo de elasticidade. Contudo está regressão, provavelmente se deve a erros e variações fornecidas pelo equipamento, uma que vez que o aumento no índice de vazios, observado em nos traço Ref-SAP e Bar-SAP ao longo do processo de cura, não é capaz de afetar o módulo de elasticidade.

Ademais, ao analisar os dados estatísticos fornecidos na Tabela 24 percebe-se que a idade de cura não é capaz de afetar significativamente os traços contendo SAP (Bar-SAP e Ref-SAP), o que pode estar associado à intensificação do processo de cura, causado pelo fornecimento equilibrado e constante de água para a hidratação do concreto, e incremento do número de poros da matriz a medida que a água é liberada. Já os demais traços, apresentaram evolução no módulo de elasticidade, principalmente em maiores idades.

Figura 64 – Módulo de elasticidade estático médio obtido pelo ensaio de tração na flexão



Fonte: Elaboração própria, (2022).

Kovler e Jensen (2007) afirmam que, em idades precoces, a maioria dos trabalhos relata uma redução no módulo de elasticidade e demais propriedade mecânicas dos materiais contendo SAP, fatores estes associados ao aumento da porosidade e umidade. Contudo, em idades avançadas, algumas publicações demonstram maiores resistências para misturas contendo SAP, em relação às misturas de referência. Segundo os autores, este aumento, provavelmente, é devido à hidratação avançada do cimento, que pode compensar a redução na resistência causada pela elevada

porosidade deixada pelo polímero, ao hidratar grãos anidros de cimento em idades avançadas.

De acordo com a Tabela 25, nas idades de 7 e 14 dias não há diferença significativa entre os quatro traços estudados, ou seja, nem a adição da fibra nem do polímero superabsorvente afetam o módulo de elasticidade. É notável que aos 14 dias os traços apresentam, praticamente, o mesmo valor de módulo de elasticidade. No entanto, aos 28 dias ocorre uma mudança brusca no comportamento, no qual o traço Bar se sobressai aos demais. Shen *et al.* (2020a), também observou um leve aumento no módulo de elasticidade com a adição da fibra Barchip, o que está relacionado ao efeito de ponte de transferência de tensões. Estaticamente, a aplicação da cura interna com o SAP não é capaz de afetar o módulo elástico do material, porém, quando este agente de cura é aplicado no traço com fibra (Bar-SAP), verifica-se uma redução nas idades avançadas, se comparado ao traço Bar.

Manzano (2016), encontrou em seu estudo que a adição de SAP leva a reduções significativas no módulo de elasticidade e que estas podem estar relacionadas ao teor de polímero adicionado. Santos (2016) concluiu, de forma semelhante, que há uma redução da propriedade em questão com a adição do SAP, onde obteve 10 % de redução para uma adição de 2%. Shen *et al.* (2016) chegaram a mesma conclusão que os demais autores, encontrando reduções nas propriedades mecânicas. Entretanto, de maneira controversa, Kong, Zhang e Lu (2015), ao avaliaram a retração autógena e as propriedades mecânicas de concretos de alta resistência com adição de SAP pré-saturados, concluíram que o módulo de elasticidade de misturas com a mesma relação a/c_{total} não é afetado pela incorporação de polímero. Assim, as propriedades mecânicas, sendo o módulo de elasticidade em especial, podem ser afetadas, principalmente, pela adição extra de água e não somente pela adição de SAP. Convém observar que as variações apresentadas nas propriedades mecânicas e no módulo de elasticidade das misturas contendo SAP, podem decorrem, não somente da adição de SAP, mas também do aumento na relação a/c_{total} , uma vez que não foi possível verificar se a água de cura participou da água de amassamento.

Tabela 24 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações das idades de cada traço para nível de confiança de 95%

Traço	Combinações	Probabilidade	Significância
Ref	7 dias x 14 dias	8,46E-02	Não
	7 dias x 28 dias	2,42E-02	Sim
	14 dias x 28 dias	5,88E-01	Não
Ref-SAP	7 dias x 14 dias	5,25E-02	Não
	7 dias x 28 dias	8,59E-01	Não
	14 dias x 28 dias	1,03E-01	Não
Bar	7 dias x 14 dias	7,47E-01	Não
	7 dias x 28 dias	7,20E-04	Sim
	14 dias x 28 dias	1,27E-03	Sim
Bar-SAP	7 dias x 14 dias	5,42E-02	Não
	7 dias x 28 dias	6,28E-01	Não
	14 dias x 28 dias	1,82E-01	Não

Fonte: Elaboração própria, (2022).

Tabela 25 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traços para nível de confiança de 95%

Idade	Combinações	Probabilidade	Significância
7 dias	Bar-SAP x Bar	2,22E-01	Não
	Ref x Bar	1,35E-01	Não
	Ref x Bar-SAP	9,82E-01	Não
	R-SAP x Bar	7,31E-01	Não
	Ref-SAP x Bar-SAP	7,06E-01	Não
	Ref-SAP x Ref	5,05E-01	Não
	14 dias	Ba-SAP x Bar	8,74E-01
Referência Barchip		9,87E-01	Não
Referência Barchip + SAP		9,74E-01	Não
Referência + SAP Barchip		8,61E-01	Não
Referência + SAP Barchip + SAP		1,00E+00	Não
Referência + SAP Referência		9,68E-01	Não
28 dias	Barchip + SAP Barchip	3,11E-02	Sim
	Referência Barchip	5,33E-01	Não
	Referência Barchip + SAP	2,19E-01	Não
	Referência + SAP Barchip	4,15E-02	Sim
	Referência + SAP Barchip + SAP	9,97E-01	Não
	Referência + SAP Referência	2,87E-01	Não

Fonte: Elaboração própria, (2022).

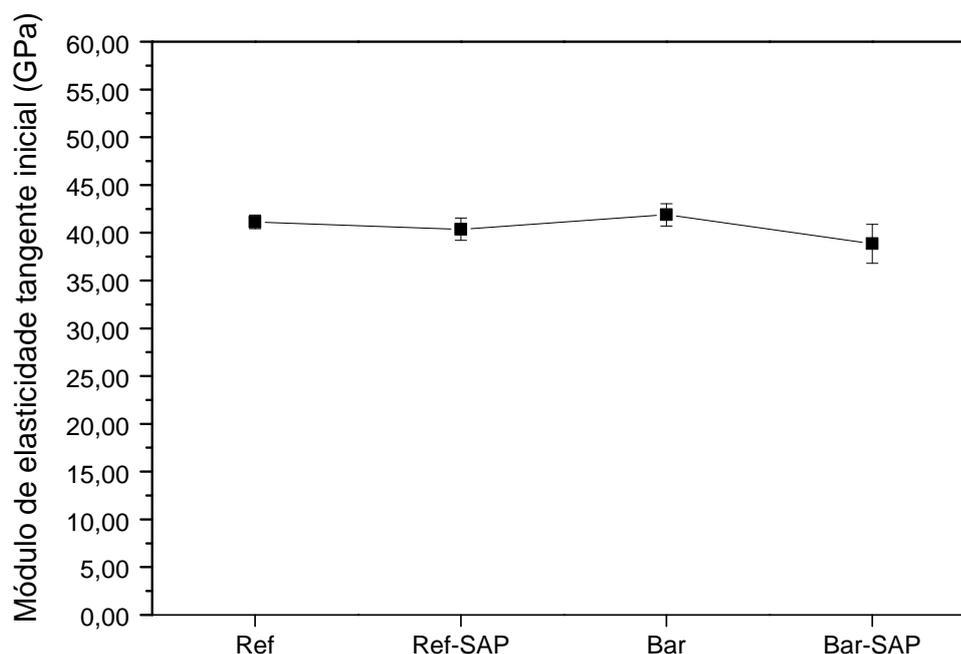
No intuito de avaliar e/ou verificar o comportamento dos diferentes traços frente ao módulo de elasticidade, foi realizado também, o ensaio de módulo de elasticidade dinâmico. Vale ressaltar, que ambos os ensaios referente a módulo de elasticidade são complementares ao estudo e foram executados no intuito de compreender de

forma mais clara o comportamento dos materiais. Na Figura 65 são apresentados os valores médios de módulo de elasticidade dinâmico obtidos de acordo com o item 4.3.8, modificados conforme a correlação proposta por Popovics, Zemajtis e Shkolnik (2008). O ensaio foi realizado após 28 dias de cura saturada. Ainda, na Tabela é apresentada a análise estatística realizada para um nível de confiança de 95% através do teste de Anova e da comparação entre pares de médias pelo teste de Tukey.

Analisando o gráfico da Figura 65 percebe-se, primeiramente, que há uma pequena variação entre os dados do mesmo ensaio, evidenciada pelo desvio padrão que se apresenta muito pequeno, diferentemente do que acontece com os dados de módulo de elasticidade estático. Neste ensaio, há uma grande precisão dos equipamentos, que fornecem dados com menor probabilidade de erro. De acordo com a Tabela 26, para o módulo por impacto, não há diferença significativa entre os traços estudados. Para este ensaio, tanto a presença da fibra Barchip, como da aplicação da cura interna, não causa nenhum efeito no módulo de elasticidade dinâmico. Apesar disso, há uma tendência do módulo diminuir com a aplicação da cura interna, principalmente quando aplicada juntamente com a fibra.

Os dados encontrados no ensaio de módulo de elasticidade dinâmico são condizentes com os resultados de módulo de elasticidade estático apresentados no item 5.7, exceto os resultados referentes ao traço Bar e Bar-SAP. Estatisticamente, não há diferença no módulo de elasticidade das diferentes misturas avaliadas, desta forma, acredita-se que os resultados de módulo de elasticidade estático tenham sido influenciados por variáveis durante a realização do ensaio, que acabaram afetando os resultados obtidos, uma vez que o volume de fibra aplicado não seria capaz de provocar tal comportamento, tão acentuado.

Figura 65 – Valores médios de módulo de elasticidade dinâmico por impacto



Fonte: Elaboração própria, (2022).

O módulo dinâmico por pulso ultrassônico também foi realizado. Contudo, seus dados revelaram um comportamento contraditório, os quais podem ser visualizados no Apêndice G. O método ultrassônico revelou um aumento do módulo com a utilização do SAP, com o maior valor obtido para o traço Ref-SAP. Ainda, a adição da fibra Barchip levou a reduções no módulo de elasticidade, com maiores efeitos quando utilizada sem a cura interna. Estes resultados estão em desacordo com os demais obtidos durante esta pesquisa e aos encontrados na literatura, onde se encontra que, quanto maior a relação água/cimento, a quantidade de vazios de ar aprisionado e/ou a incorporação de ar, menor será o módulo de elasticidade. Isso ocorre por conta do progressivo enfraquecimento da matriz cimentícia, fazendo com que haja um aumento da porosidade, afetando (reduzindo) a sua rigidez.

Tabela 26 – Análise pelo teste de Tukey para as combinações dos traços para nível de confiança de 95%

Combinações	Probabilidade	Significância
Bar- SAP x Bar	1,12E-01	Não
Ref x Bar	9,59E-01	Não
Ref x Bar-SAP	2,20E-01	Não
Ref-SAP x Bar	5,05E-01	Não
Ref-SAP x Bar-SAP	6,58E-01	Não
Ref-SAP x Ref	7,73E-01	Não

Fonte: Elaboração própria, (2022).

É importante salientar que o SAP, como já esperado, levou a reduções nas

propriedade mecânicas, mas reduziu de forma considerável a retração total, ao mitigar principalmente a retração autógena. A fibra Barchip, por sua vez, quando inserida no concreto sem cura interna, melhorou a ductilidade da matriz, serviu como barreira física diminuindo o índice de vazios e a conectividade entre os poros, além de superar os efeitos do polímero superabsorvente na mitigação da retração total, devido aos seus efeitos na retração por secagem. Porém, quando adicionada ao concreto com SAP, a fibra não conseguiu compensar a redução das propriedades mecânicas causadas pela cura interna, não satisfazendo o seu principal objetivo. Resumidamente, para este tipo de concreto e para as propriedades avaliadas durante este trabalho, a adição conjunta da macrofibra e do SAP não foi benéfica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com base nos resultados apresentados, fornecendo respostas aos objetivos estabelecidos no Capítulo 1. Ainda, este capítulo fornece algumas sugestões para trabalhos futuros, no intuito de complementar os aspectos de desempenho mecânico e durabilidade dos concretos estudados, os quais não foram abordados neste trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objetivo analisar questões mecânicas e de durabilidade de concretos alta resistência, com a utilização de macrofibras de polipropileno e SAP, como agente de cura interna visando sua utilização em estruturas de concreto, principalmente em rodoviárias. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

Em relação ao processo de hidratação:

- Os traços Bar-SAP e Bar apresentaram variações no pico de temperatura de 13,4% e 19% maiores que os traços Ref-SAP e Ref, respectivamente. A fibra ao agir como uma barreira física, retardou e dificultou a movimentação da água, o que pode ter gerado uma intensificação do processo de hidratação. De maneira semelhante, a adição do SAP provocou um aumento na temperatura de pico, contudo seu efeito não foi tão significativo quanto a adição da fibra. De modo semelhante, o tempo necessário para o ápice das reações, sofreu forte influências da incorporação da temperatura de moldagem e, principalmente, do teor de aditivo superplastificante utilizado, que retardou o início das reações devido ao seu efeito no tempo de pega. Desta forma, os traços com adição da fibra apresentaram reações mais lentas.
- A adição da fibra e do SAP tendem a reduzir a velocidade do processo de hidratação, porém podem manter o processo por um maior período, assim, uma maior quantidade de grãos de cimento anidro podem ser hidratados. Contudo, os efeitos positivos na hidratação não foram refletidos nas demais propriedades. Acredita-se que a presença do SAP possa ter aumentado o número de vazios na interface da fibra, gerando pontos frágeis, além de criar canais que facilitaram a percolação da água, o que justifica a maior retração total e por secagem.

Em relação à porosidade e absorção de água:

- A incorporação do SAP aumentou a quantidade total de poros em ambos os traços (Ref-SAP e Bar-SAP). Contudo, de acordo com o ensaio de absorção de água por capilaridade, o SAP refina o tamanho dos poros e aumenta a conectividade entre eles.

- O ensaio de absorção de água por capilaridade revelou que a adição da fibra apesar de não modificar o índice de vazios, diminui a interconectividade dos poros devido à barreira física. A adição do SAP, como agente de cura interna, combinada com a da fibra, por sua vez, elevou o índice de vazios, devido aos seus vazios remanescentes e aos vazios criados na interface entre a a fibra e o SAP, o que resultou em uma maior capacidade de absorção total, contudo a barreira física criada pela fibra, reduziu a interconectividade entre poros levando a uma diminuição da taxa de absorção e aumento da resistência capilar.

Em relação às deformações por retração livre:

- O SAP reduziu a retração autógena, principalmente em idades precoces, onde até o quinto dia não foram observadas deformações em ambos os traços (Ref-SAP e Bar-SAP). As reduções em idades posteriores foram de aproximadamente 53,6% para os traços Ref e Ref-SAP e de 40% para Bar e Bar-SAP. A adição da fibra Barchip isoladamente, não traz benefícios à retração autógena, apresentando resultados semelhantes ao traço Ref.
- A fibra reduziu consideravelmente a retração por secagem, devido ao seu efeito de ponte de transferência de tensões e ao efeito de barreira física para a movimentação da água. A adição do SAP juntamente com a fibra, no entanto, causou aumento das deformações por secagem, ao elevar a quantidade de água livre na mistura.
- De modo semelhante, a fibra Barchip revelou um efeito positivo na retração total. Quando adicionada de forma isolada, supera o traço referência contendo SAP em 13% aos 40 dias. Logo, acredita-se que nas condições deste estudo, o SAP e a Barchip (adicionados isoladamente) possuem capacidade semelhante de mitigar a retração total. O SAP, ao liberar água conforme a diminuição da umidade interna, mantém os poros cheios, evitando assim a autodessecação. Já a fibra, ao atuar como uma barreira física, dificulta a movimentação da água e ameniza consideravelmente o processo de retração por secagem.
- O traço Bar-SAP apresentou um aumento nas deformações totais, se igualando ao Ref. Este fato pode ser atribuído a uma possível falha na matriz, no qual alguns grãos de SAP próximos às fibras, ao liberarem água, deixaram mais vazios na interface, o que facilitou a percolação de água e, conseqüentemente, aumento da retração por secagem e total.

Em relação ao comportamento mecânico:

- A aplicação da cura interna, através do SAP, levou a reduções significativas na resistência à compressão, provocadas pelo aumento da porosidade. Quanto a

fibra Barchip, esta não foi capaz de elevar consideravelmente a resistência última da matriz, nos ensaios de compressão e tração na flexão. Contudo, proporcionou um comportamento dúctil ao concreto e, ao ser utilizada juntamente com SAP, compensou parte da redução provocada pelo polímero superabsorvente.

- A resistência à tração na flexão não é influenciada pela adição do SAP e da fibra Barchip nos teores avaliados. Contudo, a presença da fibra fornece tensão residual ao concreto, devido ao efeito de ponte de transferência de tensões.
- A incorporação do SAP, assim como da fibra Barchip, não provocaram alterações frente ao módulo de elasticidade.

De modo geral, a presença da fibra, no teor e traço estudados, quando usada isoladamente sem SAP, mantendo-se a cura externa, apresenta-se como a melhor opção, uma vez que o efeito positivo gerado na retração por secagem, sobrepõe seu efeito negativo na retração autógena, resultando em menor retração total. Adicionalmente, os resultados de desempenho mecânico do traço Bar evidenciaram melhor resistência à compressão e tração na flexão, além de apresentar modo de ruptura dúctil. Bons resultados também são obtidos sem o uso da fibra (Ref-SAP), o qual apresentou pequenas taxas de retração total (em especial a autógena), embora haja diminuição na resistência mecânica.

Assim, o SAP, apesar de inferir efeitos negativos no desempenho mecânico, significativamente, reduziu apenas a resistência à compressão. Seus efeitos na retração autógena, na retração total e na hidratação, no entanto, foram positivos, revelando que o SAP pode ser utilizado como um agente de cura interna, mitigando as deformações causadas pela retração e potencializando a hidratação da matriz, sendo recomendado para matrizes de matrizes alta resistência.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados dos ensaios que auxiliaram na avaliação da estrutura de poros do concreto, tais como absorção, índice de vazios e absorção de água por capilaridade, sugerem a liberação de água pelo SAP antes dos 7 dias. De forma complementar, o ensaio de retração autógena indica que não há deformações até o quinto dia, onde logo após ocorre um aumento considerável da deformação, corroborando com a hipótese de que o SAP libera majoritariamente sua quantidade total de água em idades precoces. Contudo, para confirmar o mecanismo de liberação de água e o tempo de liberação de água do SAP, faz-se necessário a realização de outros ensaios, como TGA e umidade interna.

A distribuição e tamanho dos poros dos concretos devem ser estudados por outros procedimentos experimentais mais específicos, tais como o uso de MIP (po-

rosimetria por intrusão de mercúrio). Isso contribui no entendimento no tamanho e distribuição dos poros deixados pelo SAP e na interface entre a fibra e a matriz.

A fibra Barchip, apesar de apresentar um elevado módulo de elasticidade e resistência à tração, não conseguiu aumentar significativamente as propriedades mecânicas da matriz e nem compensar à queda nas propriedades mecânicas provocadas pelo SAP. Tal fato pode estar associado a dosagem de adição utilizada. Desta forma, maiores teores de fibra devem ser estudados.

Por fim, sugere-se o estudo de materiais alternativos a serem aplicados junto ao SAP, no intuito de fornecer um bom desempenho frente à retração, sem que as propriedades mecânicas do concreto seja substancialmente prejudicada. Sugerem-se estudos com adições minerais, para verificação se a produção de produtos secundários de hidratação podem preencher os vazios deixados pelo SAP em idades avançadas. Estudos com agentes cristalizantes, visando o aumento da resistência em concreto com SAP, podem ser interessantes, uma vez que dada a percolação de água através dos poros do concreto, haverá a formação de cristais que colmatam a porosidade e permanecem na estrutura durante toda a vida útil do concreto.

REFERÊNCIAS

- ABCPOLYMER. Disponível em: < <https://abcpolymerindustries.com/fibers/fiberforce-100/>>. **Acesso em 23/02/2021**, Abcpolymer: an international plastics group, 2017. Citado na página 31.
- ACKER, P.; TORRENTI, J. M.; GUÉRINET, M. Controle da fissuração nas primeiras idades: condições de durabilidade das obras de concreto. In: IBRACON, SÃO PAULO. **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. [S.l.], 2014. p. 181–206. Citado na página 43.
- AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J.; CHANDRASHEKHARA, K. **Análise e desempenho de compostos de fibra**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017. (E-book). Citado na página 25.
- AGOSTINHO, L. B. **Estudo reológico de pastas de cimento contendo polímero superabsorvente e nano partículas de sílica**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 21, 22 e 57.
- ALLENA, S.; NEWTON, C. M. State-of-the-art review on early-age shrinkage of concrete. **Indian Concrete Journal**, v. 85, n. 7, p. 14–20, 2011. Citado na página 38.
- AMERICA SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete**. C157/C157M. Philadelphia, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 86 e 88.
- ANDRADE NETO, W. N. d. **Caracterização de polímero superabsorvente para mitigação de retração autógena em microconcretos de alta resistência**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 20, 45, 58 e 60.
- ASSMANN, A. **Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers**. Tese (Doutorado) — Universidade de Stuttgart, Alemanha, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 20, 58, 59, 62 e 63.
- ASSOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **Fibras para hormigón - Fibras poliméricas. Definiciones, especificaciones y conformidad**. UNE 14889-2. Barcelona, 2008. Citado na página 31.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248. Rio de Janeiro, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 71, 73 e 82.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados para concreto - Especificação**. NBR 7211. Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 72.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. NBR 9778. Rio de Janeiro, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 91 e 92.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. NBR 7218. Rio de Janeiro, 2010. Citado na página 73.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos**. NBR 12142. Rio de Janeiro, 2010. Citado na página 94.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. NBR 5738. Rio de Janeiro, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 91, 93 e 94.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. NBR 16605. Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 82.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e deformação a compressão**. NBR 8522. Rio de Janeiro, 2017. Citado na página 96.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. NBR 5739. Rio de Janeiro, 2018. Citado na página 93.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR 16889. Rio de Janeiro, 2020. Citado na página 86.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16917. Rio de Janeiro, 2021. Citado na página 71.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. NBR 16916. Rio de Janeiro, 2021. Citado na página 73.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. NBR 16972. Rio de Janeiro, 2021. Citado na página 71.

BALLOCH, H. *et al.* Properties enhancement of super absorbent polymer (sap) incorporated self-compacting cement pastes modified by nano silica (ns) addition. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 203, p. 18–26, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 57.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and concrete Research**, Elsevier, v. 36, n. 7, p. 1263–1267, 2006. Citado na página 51.

BARROS, B. L. S. d. **Estudo do efeito pozolânico da cerâmica vermelha nas propriedades de concretos submetidos a temperaturas elevadas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2022. Citado na página 106.

BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2001. Citado na página 38.

- BAYASI, Z.; DHAHERI, M. A. Effect of exposure to elevated temperature on polypropylene fiber-reinforced concrete. **Materials Journal**, v. 99, n. 1, p. 22–26, 2002. Citado na página 32.
- BEHFARNIA, K.; BEHRAVAN, A. Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels. **Materials & Design**, Elsevier, v. 55, p. 274–279, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 122.
- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites - 2ª edição**. [S.l.]: Taylor & Francis, 2007. (E-book). Citado 4 vezes nas páginas 26, 28, 29 e 32.
- BENTZ, D. P.; JENSEN, O. M. Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 26, n. 6, p. 677–685, 2004. Citado na página 48.
- BENTZ, D. P.; WEISS, W. J. **Internal curing: a 2010 state-of-the-art review**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2011. Citado na página 49.
- BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida kevlar**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- BERTELSEN, I.; OTTOSEN, L.; FISCHER, G. Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 230, p. 116769, 2020. Citado na página 50.
- BOIVIN, S. G. **Retrait au jeune âge du béton: Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène. These presente pour obtenir le titre de docteur de L.C.P.C, Paris**, 2001. Citado na página 38.
- BORGES, J. G. **Metodologia dos tubos corrugados para determinação da retração autógena em materiais cimentícios de alto desempenho contendo polímero superabsorvente (SAP)**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 21, 41 e 53.
- BYARD, B. E.; RIES, J. Optimizing the sustainability of concrete through internal curing. **Special Publication**, v. 290, p. 1–10, 2012. Citado na página 48.
- CAMILLE, C. *et al.* Performance behaviour of macro-synthetic fibre reinforced concrete subjected to static and dynamic loadings for sleeper applications. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 270, p. 121469, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 32, 33, 122, 124 e 127.
- CAO, Q. *et al.* A comparative study of combined treatments for enhanced early-age cracking control of self-consolidating concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 248, p. 118473, 2020. Citado na página 50.
- COSTA, F. B. P. d. **Análise da durabilidade de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação reforçados com fibras**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 27, 30, 38 e 111.

COUTO, P. B. **Caracterização reológica de pastas de cimento portland de alta resistência contendo diferentes tipos de polímeros superabsorventes pela técnica de reometria rotacional**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 57, 58, 60 e 82.

DAWOOD, E. T.; RAMLI, M. Development of high strength flowable mortar with hybrid fiber. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 24, n. 6, p. 1043–1050, 2010. Citado na página 22.

DEUTSCHES INTITUT FÜR NORMUNG. **Esting of mortars containing mineral binders; freshly mixed mortars containing aggregates of dense structure (heavy aggregates); determination of consistence, bulk density and air content**. EN 18555-2. German, 1982. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 80.

DIÓGENES, H. *et al.* Determinação do módulo de elasticidade do concreto a partir da resposta acústica. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, SciELO Brasil, v. 4, p. 803–813, 2011. Citado na página 97.

DNIT. Manual de pavimentos rígidos. **Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes**, IPR. Publ. 714, 2005. Citado na página 94.

DOMONE, P. L. J.; ILLSTON, J. M. **Materiais de construção: sua natureza e comportamento - 3ª Edição**. [S.l.]: CRC Press, 2010. (E-book). Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

ESTEVES, L. P. On the absorption kinetics of superabsorbent polymers. In: RILEM PUBLICATIONS SARL. **International RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete**. [S.l.], 2010. p. 77–84. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.

ESTEVES, L. P. Superabsorbent polymers: In their interaction with water and pore fluid. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 33, n. 7, p. 717–724, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 53.

FALLAH, S.; NEMATZADEH, M. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 132, p. 170–187, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

FAN, J. *et al.* Evaluation of the shrinkage and fracture properties of hybrid fiber-reinforced sap modified concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 256, p. 119491, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 65.

FIGUEIREDO, A. D. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto. **Congresso Brasileiro de Concreto**, IBRACON, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 48.

FIGUEIREDO, A. D. d. Concreto com fibras de aço. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/260, 2000. Citado na página 27.

FIGUEIREDO, A. D. d. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 25, 26, 29 e 30.

FRIEDRICH, S. Superabsorbent polymers (sap). In: **Application of super absorbent polymers (sap) in concrete construction**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 13–19. Citado 2 vezes nas páginas 83 e 86.

GENCEL, O. *et al.* Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. **Materials Research Innovations**, Taylor & Francis, v. 15, n. 3, p. 216–225, 2011. Citado na página 33.

GEORGIU, A. V.; PANTAZOPOULOU, S. J. Effect of fiber length and surface characteristics on the mechanical properties of cementitious composites. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 125, p. 1216–1228, 2016. Citado na página 33.

GONG, J.; ZENG, W.; ZHANG, W. Influence of shrinkage-reducing agent and polypropylene fiber on shrinkage of ceramsite concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 159, p. 155–163, 2018. Citado na página 51.

HAN, T. *et al.* Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume. **Materials and Design**, Elsevier, 2012. Citado na página 49.

HASHOLT, M. T.; JESPERSEN, M. H. S.; JENSEN, O. M. Mechanical properties of concrete with sap. part i: Development of compressive strength. In: RILEM PUBLICATIONS. **International RILEM conference on use of superabsorbent polymers and other new additives in concrete**. [S.l.], 2010. p. 117–126. Citado na página 121.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2010. Citado na página 44.

HOLT, E. Very early age autogenous shrinkage: governed by chemical shrinkage or self-desiccation. In: **Proceedings of the Third International Research Seminar in Lund, Lund, Sweden**. [S.l.: s.n.], 2002. p. 1–25. Citado 3 vezes nas páginas 38, 41 e 42.

IRRIGARAY, M.; BRAZ CÉSAR, M. **Mecanismos de autoreparo em materiais cimentícios: uma visão geral**. 2019. Citado na página 20.

JENSEN, O. M. Water absorption of superabsorbent polymers in a cementitious environment. In: RILEM PUBLICATIONS. **International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering 2011**. [S.l.], 2011. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. Water-entrained cement-based materials: I. principles and theoretical background. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 31, n. 4, p. 647–654, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 45, 53, 54, 62 e 63.

KAKOOEI, S. *et al.* The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 27, n. 1, p. 73–77, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 22, 38 e 50.

KHOURY, G.; WILLOUGHBY, B. Polypropylene fibres in heated concrete. part 1: Molecular structure and materials behaviour. **Magazine of concrete research**, Thomas Telford Ltd, v. 60, n. 2, p. 125–136, 2008. Citado na página 32.

- KONG, X.-m.; ZHANG, Z.-l.; LU, Z.-c. Effect of pre-soaked superabsorbent polymer on shrinkage of high-strength concrete. **Materials and Structures**, Springer, v. 48, n. 9, p. 2741–2758, 2015. Citado na página 131.
- KONO, H.; FUJITA, S. Biodegradable superabsorbent hydrogels derived from cellulose by esterification crosslinking with 1, 2, 3, 4-butanetetracarboxylic dianhydride. **Carbohydrate Polymers**, Elsevier, v. 87, n. 4, p. 2582–2588, 2012. Citado na página 76.
- KOPPE, A. **Utilização de resíduo à base de polímero superabsorvente e fibra celulósica como agente de cura interna em matrizes de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2016. Citado na página 48.
- KOVLER, K.; JENSEN, O. Internal curing of concrete, state-of-the-art report of rilem technical committee 196-icc. **RILEM Report**, v. 41, 2007. Citado na página 130.
- KUMM, T. C. *et al.* **Influência do emprego de polímeros superabsorventes nas propriedades de materiais à base de cimento Portland**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- LEITE, A. M.; CASTRO, A. L. de. Influência da matriz cimentícia no comportamento de concretos reforçados com fibras. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, SciELO Brasil, v. 13, n. 3, p. 543–562, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. [S.l.]: Editora Blucher, 2006. Citado na página 28.
- LIMA, P. R. L. **Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal, 2004**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro -PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004. Citado na página 28.
- LIU, J. *et al.* An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 146, p. 702–712, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 21, 49 e 53.
- LOPES, A. N. d. M. **Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 21, 41 e 49.
- LOPES, B. S. **Polímeros reforçados por fibras vegetais uma revisão sobre esses compósitos**. [S.l.]: Editora Edgard Blücher, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- LUCENA, J. C. T. d. **Concreto reforçado com fibras de polipropileno: estudo de caso para aplicação em painel alveolar de parede fina**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017. Citado na página 29.
- LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete**. Tese (Doutorado) — Università degli Studi di Brescia, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 36, 41, 44 e 101.

LYU, Z. *et al.* Research on shrinkage development and fracture properties of internal curing pavement concrete based on humidity compensation. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 203, p. 417–431, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 56, 57, 111 e 121.

LYU, Z. *et al.* Absorption characteristics and shrinkage mitigation of superabsorbent polymers in pavement concrete. **International Journal of Pavement Engineering**, Taylor & Francis, p. 1–15, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 22, 53, 57, 106, 111 e 113.

MANZANO, M. A. R. **Estudo Experimental de Materiais Cimentícios de Alta Resistência modificados com Polímeros Superabsorventes (PSAs) como Agentes de Cura Interna**. Tese (Doutorado) — Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia, 2016. Citado 9 vezes nas páginas 21, 22, 39, 41, 53, 54, 57, 83 e 131.

MECHTCHERINE, V.; DUDZIAK, L. Effects of superabsorbent polymers on shrinkage of concrete: Plastic, autogenous, drying. In: **Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction**. [S.l.]: Springer, 2012. p. 63–98. Citado na página 48.

MECHTCHERINE, V. *et al.* Application of super absorbent polymers (sap) in concrete construction—update of rilem state-of-the-art report. **Materials and Structures**, Springer, v. 54, n. 2, p. 1–20, 2021. Citado na página 54.

MEDINA, N. F.; BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Enhancement of durability of concrete composites containing natural pozzolans blended cement through the use of polypropylene fibers. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 61, p. 214–221, 2014. Citado na página 32.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concrete: Microstructure, Properties and Materials - 3ª edição**. [S.l.]: Publicação McGraw-Hill, 2006. (E-book). Citado 5 vezes nas páginas 30, 35, 36, 43 e 99.

MILAGRES, E. A. *et al.* Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2019. Citado na página 44.

MOHAMMADHOSSEINI, H. *et al.* Creep and drying shrinkage performance of concrete composite comprising waste polypropylene carpet fibres and palm oil fuel ash. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 30, p. 101250, 2020. Citado na página 51.

MONTARDO, J. P. A retração do concreto. **Boletim Técnico da Associação Nacional de Pisos e Revestimentos de Alto Desempenho**, 2009. Citado na página 34.

MÖNNIG, S. Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete. **Otto-Graf-Journal**, v. 16, p. 193, 2005. Citado na página 62.

MÖNNIG, S. **Superabsorbing additions in concrete – applications, modelling and comparison of different internal water sources**. Tese (Doutorado) — Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 54, 60 e 61.

- NAAMAN, A. E. *et al.* Fiber pullout and bond slip. i: Analytical study. **Journal of Structural Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 117, n. 9, p. 2769–2790, 1991. Citado na página 28.
- NETO, J. T. d. S. **Compósito cimentício reforçado com fibras poliméricas de alta resistência mecânica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Citado na página 26.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. [S.l.]: Bookman Editora, 2015. (E-book). Citado na página 115.
- NOUMOWE, A. Mechanical properties and microstructure of high strength concrete containing polypropylene fibres exposed to temperatures up to 200 c. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 35, n. 11, p. 2192–2198, 2005. Citado na página 32.
- NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 42, 43, 46 e 47.
- OLIVIER, G. *et al.* Combined effect of nano-silica, super absorbent polymers, and synthetic fibres on plastic shrinkage cracking in concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 192, p. 85–98, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 64.
- ONGHERO, L. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de vidro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 20, 38 e 50.
- ORDÓÑEZ, S. T. L. **Mitigação da retração autógena em microconcretos de alta resistência com adição de polímeros superabsorventes e aditivo redutor de retração**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade Tecnologia - Universidade de Brasília, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 37, 46 e 57.
- PAKRAVAN, H.; LATIFI, M.; JAMSHIDI, M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review. **Construction and building materials**, Elsevier, v. 142, p. 280–294, 2017. Citado na página 126.
- PAKRAVAN, H. R.; OZBAKKALOGLU, T. Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 207, p. 491–518, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 50.
- PINTO JÚNIOR, N. O. Análise do desempenho de concretos incorporando baixos teores de fibras de polipropileno, nylon e poliéster. **Campinas: Universidade Estadual de Campinas**, 2001. Citado na página 29.
- POORSAHELI, H. B. *et al.* A study on the durability parameters of concrete structures reinforced with synthetic fibers in high chloride concentrated shorelines. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 200, p. 578–585, 2019. Citado na página 126.
- POPOVICS, J. S.; ZEMAJTIS, J.; SHKOLNIK, I. A study of static and dynamic modulus of elasticity of concrete. **ACI-CRC Final Report**, University of Illinois Urbana, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 97 e 133.

QIN, X. *et al.* Research on water transport behaviors and hydration characteristics of internal curing pavement concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 248, p. 118714, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 56, 57, 121 e 125.

QUININO, U. C. d. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

RAMEZANIANPOUR, A. *et al.* Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 44, p. 411–418, 2013. Citado na página 104.

RAMOS, M. F. **Análise experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, 2002. Citado na página 25.

REZENDE, M. C.; COSTA, M. L.; BOTELHO, E. C. Compósitos estruturais: tecnologia e prática. **São Paulo: Artliber**, p. 34–37, 2011. Citado na página 25.

RIGHI, D. P. **Caracterização do comportamento de compósitos cimentícios de elevada capacidade de deformação com a utilização de fibras de polipropileno e cinza de casca de arroz**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015. Citado na página 87.

RODRIGUES, G. S. S. **Contribuição ao estudo da retração e da fluência e seus mecanismos de atuação a baixas idades em concretos estruturais**. Tese (Doutorado) — Faculdade Tecnológica - Universidade de Brasília, 2010. Citado na página 36.

RODRIGUES, P. P.; MONTARDO, J. P. A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos. In: **44º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, Belo Horizonte/Brasil**. [S.l.: s.n.], 2002. Citado na página 32.

ROHOLLAH, R. *et al.* Effect of superabsorbent polymers on microstructure and strength of blended cements mortars reinforced by polymeric fibre. **Cement**, Elsevier, v. 9, p. 100041, 2022. Citado na página 105.

SALVADOR, R. P.; FIGUEIREDO, A. D. d. Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 18, p. 1273–1285, 2013. Citado na página 27.

SANTOS, J. T. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de São Paulo, 1999. Citado na página 21.

SANTOS, T. A. C. **Estudo da adição de polímero superabsorvente e de nano partículas de sílica para melhorar propriedades de concretos de alta resistência**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 22, 57 e 131.

SCRIVENER, K. L.; NONAT, A. Hydration of cementitious materials, present and future. **Cement and concrete research**, Elsevier, v. 41, n. 7, p. 651–665, 2011. Citado na página 35.

SHEN, D. *et al.* Effect of barchip fiber on stress relaxation and cracking potential of concrete internally cured with super absorbent polymers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 249, p. 118392, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 65.

SHEN, D. *et al.* Influence of barchip fiber length on early-age behavior and cracking resistance of concrete internally cured with super absorbent polymers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 214, p. 219–231, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 31 e 65.

SHEN, D. *et al.* Early-age behavior and cracking resistance of high-strength concrete reinforced with dramix 3d steel fiber. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 196, p. 307–316, 2019. Citado na página 22.

SHEN, D. *et al.* Effect of polypropylene plastic fibers length on cracking resistance of high performance concrete at early age. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 244, p. 117874, 2020. Citado na página 52.

SHEN, D. *et al.* Influence of barchip fiber on early-age cracking potential of high performance concrete under restrained condition. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 187, p. 118–130, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 20, 31, 52, 101 e 113.

SHEN, D. *et al.* Effect of internal curing with super absorbent polymers on autogenous shrinkage of concrete at early age. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 106, p. 512–522, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 49, 54, 121 e 131.

SHEN, D. *et al.* Early-age stress relaxation and cracking potential of high-strength concrete reinforced with barchip fiber. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 258, p. 119538, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 20, 31, 52 e 131.

SHEN, D. *et al.* Influence of barchip fiber on early-age autogenous shrinkage of high strength concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 256, p. 119223, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 20, 31 e 52.

SHEN, D. *et al.* Influence of barchip fiber on early-age autogenous shrinkage of high-strength concrete internally cured with super absorbent polymers. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 264, p. 119983, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 20, 22, 31, 65, 100 e 113.

SILVA, E. F. **Variações dimensionais em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração**. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007. Citado 8 vezes nas páginas 37, 39, 40, 41, 42, 43, 45 e 115.

SILVA JÚNIOR, P. F. **Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 21, 22, 57 e 62.

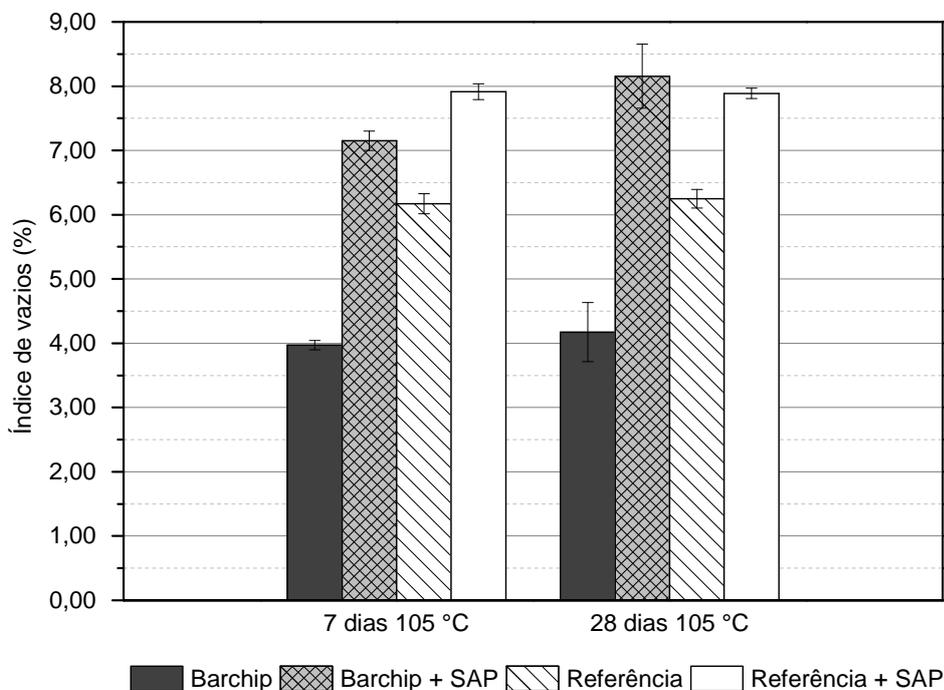
- SILVA, L. **Análise da influência das microfibras de polipropileno no controle da retração hidráulica no concreto autoadensável**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 50.
- SILVA, N. G. **Avaliação da retração e da fissuração em revestimento de argamassa na fase plástica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 50.
- SILVOSO, M. M. **Otimização da fase construtiva de estruturas de concreto em face dos efeitos da hidratação via algoritmos genéticos**. 2003. 169 f. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.
- SIQUEIRA, J. E. L. d. **Utilização de fibras naturais e sintéticas em argamassas de revestimento de alvenaria: Estudo comparativo de desempenho**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.
- SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. **Cement and Concrete Composites**, Elsevier, v. 29, n. 8, p. 603–608, 2007. Citado na página 33.
- SUAREZ, M. L. G. **Polímeros superabsorventes (psa) como agente de cura interna para prevenir fissuração em concretos de alta resistência**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 60.
- SUN, Z.; XU, Q. Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete. **Materials Science and Engineering: A**, Elsevier, v. 527, n. 1-2, p. 198–204, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- TAN, Y. *et al.* Influence of superabsorbent polymers (saps) type and particle size on the performance of surrounding cement-based materials. **Construction and Building Materials**, Elsevier, p. 121442, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 22, 49 e 56.
- TAYLOR, H. F. *et al.* **Cement chemistry**. [S.l.]: Thomas Telford London, 1997. v. 2. Citado na página 36.
- TERMINOLOGY, A. C. American concrete institute. “**Ferrocement**.” **Internet: <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/ferrocement>**, [May 11, 2019], 2013. Citado na página 48.
- TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Construction and Building Materials**, 2005. Citado na página 43.
- TRAN, N. P. *et al.* A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, p. 102210, 2021. Citado na página 49.
- VIEIRA, L. M. G. **Efeito do tratamento químico e da adição de nano sílica em compósitos híbridos de sisal**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São João Del-Rei, 2013. Citado na página 30.

- WANG, K.; SHAH, S. P.; PHUAKSUK, P. Plastic shrinkage cracking in concrete materials—influence of fly ash and fibers. **Materials Journal**, v. 98, n. 6, p. 458–464, 2001. Citado na página 111.
- WATANABE, P. S. Concretos especiais—propriedades, materiais e aplicações. **Bauru (São Paulo): Universidade Estadual Paulista (UNESP)—Campus Bauru**, 2008. Citado na página 25.
- WU, L. *et al.* Autogenous shrinkage of high performance concrete: A review. **Construction and Building Materials**, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 41, 48, 50 e 115.
- YANG, J. *et al.* Research on drying shrinkage deformation and cracking risk of pavement concrete internally cured by saps. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 227, p. 116705, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 55, 113 e 115.
- YANG, J. *et al.* Effect of superabsorbent polymers on the drying and autogenous shrinkage properties of self-leveling mortar. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 201, p. 401–407, 2019. Citado 8 vezes nas páginas 22, 49, 55, 107, 111, 115, 121 e 125.
- ZHANG, P.; LI, Q.; ZHANG, H. Combined effect of polypropylene fiber and silica fume on mechanical properties of concrete composite containing fly ash. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 30, n. 16, p. 1349–1358, 2011. Citado na página 32.
- ZHONG, P. *et al.* Internal curing with superabsorbent polymers of different chemical structures. **Cement and Concrete Research**, Elsevier, v. 123, p. 105789, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 22, 49, 56 e 64.

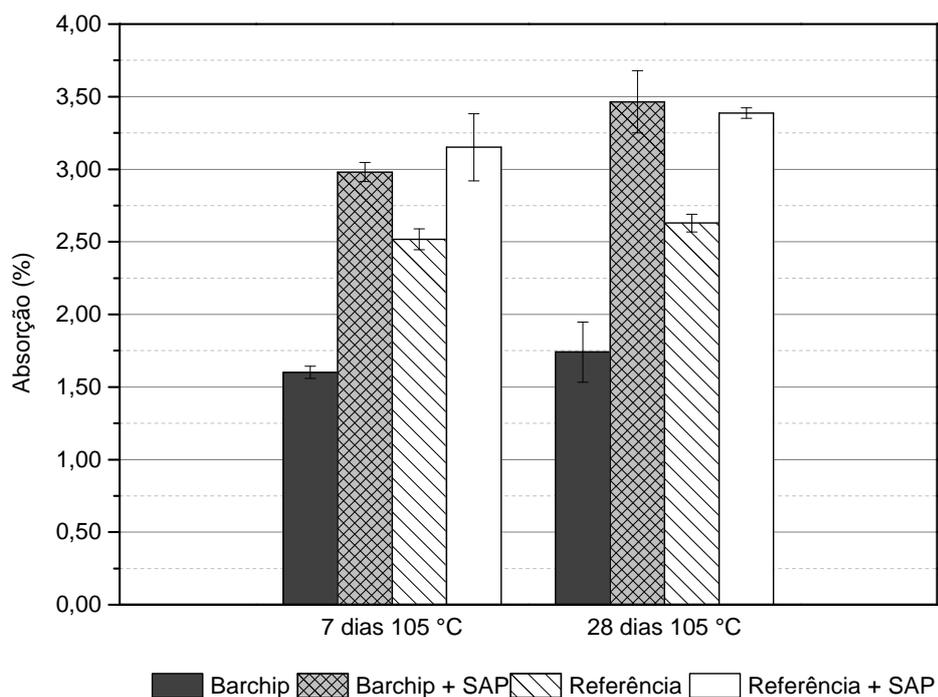
Apêndices

APÊNDICE A – RESULTADOS DE ABSORÇÃO, MASSA ESPECÍFICA E ÍNDICE DE VAZIOS

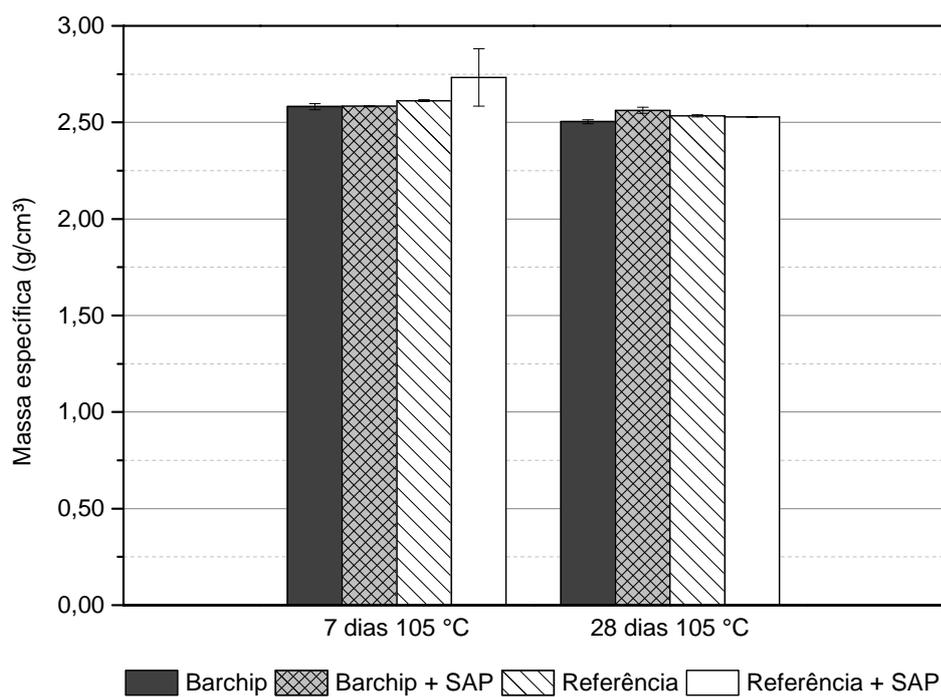
a) Resultados de índice de vazios, realizados com a temperatura de 105 °C



b) Resultados de absorção, realizados com a temperatura de 105 °C



c) Resultados de massa específica, realizados com a temperatura de 105 °C



APÊNDICE B – RESULTADOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

a) Resultados de absorção de água por capilaridade

Barchip						
Corpo de prova	Tempo (horas)					
	0 h	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
1	0,000	0,170	0,229	0,362	0,488	0,600
2	0,000	0,223	0,300	0,469	0,579	0,661
3	0,000	0,238	0,356	0,591	0,687	0,752
Média (g/cm ³)	0,000	0,211	0,295	0,474	0,585	0,671
Desvio padrão	0,000	0,035	0,064	0,115	0,100	0,076

Barchip + SAP						
Corpo de prova	Tempo (horas)					
	0 h	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
1	0,000	0,246	0,309	0,437	0,526	0,609
2	0,000	0,254	0,345	0,523	0,648	0,731
3	0,000	0,270	0,356	0,556	0,689	0,776
Média (g/cm ³)	0,000	0,256	0,336	0,505	0,621	0,706
Desvio padrão	0,000	0,012	0,024	0,061	0,085	0,086

Referência						
Corpo de prova	Tempo (horas)					
	0 h	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
1	0,000	0,246	0,320	0,565	0,705	0,772
2	0,000	0,270	0,364	0,639	0,795	0,905
3	0,000	0,207	0,272	0,465	0,592	0,689
Média (g/cm ³)	0,000	0,241	0,319	0,556	0,698	0,788
Desvio padrão	0,000	0,032	0,046	0,087	0,102	0,109

Referência + SAP						
Corpo de prova	Tempo (horas)					
	0 h	3 h	6 h	24 h	48 h	72 h
1	0,000	0,298	0,397	0,618	0,713	0,882
2	0,000	0,320	0,428	0,777	1,029	1,179
3	0,000	0,269	0,363	0,584	0,826	0,977
Média (g/cm ³)	0,000	0,296	0,396	0,659	0,856	1,013
Desvio padrão	0,000	0,026	0,032	0,103	0,160	0,152

b) Resultados de altura de lâmina de água

Corpo de prova	Altura lâmina de água (cm)	Altura média lâmina de água (cm)	Desvio padrão da altura da lâmina de água
Bar	2,25	2,15	0,61
Bar	2,70		
Bar	1,50		
Bar + SAP	3,60	4,20	0,72
Bar + SAP	5,00		
Bar + SAP	4,00		
Ref	5,00	6,33	3,21
Ref	10,00		
Ref	4,00		
Ref + SAP	7,00	8,50	1,80
Ref + SAP	8,00		
Ref + SAP	10,50		

c) Resultados para o ensaio de compressão diametral

Corpo de prova	Tensão (MPa)	Tensão média (MPa)	Desvio padrão da tensão
Bar	6,25	6,23	0,02
Bar	6,22		
Bar	6,23		
Bar + SAP	5,09	5,14	0,14
Bar + SAP	5,29		
Bar + SAP	5,03		
Ref	4,77	5,09	0,28
Ref	5,18		
Ref	5,31		
Ref + SAP	4,52	4,33	0,22
Ref + SAP	4,39		
Ref + SAP	4,08		

APÊNDICE C – RESULTADOS DE RETRAÇÃO LIVRE

a) Resultados de retração autógena do traço Barchip

Barchip					
Idade (dias)	Deformação (μm)			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	-33,33	0,00	0,00	-11,11	19,25
3	-33,33	-33,33	0,00	-22,22	19,25
4	-33,33	-33,33	-300,00	-122,22	153,96
5	-66,67	-33,33	-300,00	-133,33	145,30
6	-66,67	-33,33	-300,00	-133,33	145,30
7	-66,67	-33,33	-300,00	-133,33	145,30
8	-66,67	-66,67	-300,00	-144,44	134,72
9	-100,00	-66,67	-300,00	-155,56	126,20
10	-100,00	-66,67	-300,00	-155,56	126,20
11	-100,00	-66,67	-300,00	-155,56	126,20
12	-100,00	-66,67	-300,00	-155,56	126,20
13	-100,00	-66,67	-300,00	-155,56	126,20
14	-100,00	-100,00	-333,33	-177,78	134,72
15	-100,00	-100,00	-333,33	-177,78	134,72
16	-100,00	-100,00	-333,33	-177,78	134,72
17	-133,33	-100,00	-333,33	-188,89	126,20
18	-133,33	-100,00	-333,33	-188,89	126,20
19	-133,33	-133,33	-333,33	-200,00	115,47
20	-133,33	-133,33	-333,33	-200,00	115,47
21	-166,67	-133,33	-400,00	-233,33	145,30
22	-166,67	-166,67	-400,00	-244,44	134,72
23	-200,00	-166,67	-400,00	-255,56	126,20
24	-200,00	-166,67	-400,00	-255,56	126,20
25	-200,00	-166,67	-400,00	-255,56	126,20
26	-200,00	-166,67	-400,00	-255,56	126,20
27	-200,00	-166,67	-400,00	-255,56	126,20
28	-200,00	-166,67	-400,00	-255,56	126,20
29	-200,00	-166,67	-466,67	-277,78	164,43
30	-200,00	-166,67	-466,67	-277,78	164,43
31	-200,00	-233,33	-466,67	-300,00	145,30
32	-200,00	-233,33	-466,67	-300,00	145,30
33	-200,00	-233,33	-466,67	-300,00	145,30
34	-266,67	-233,33	-466,67	-322,22	126,20
35	-266,67	-233,33	-466,67	-322,22	126,20
36	-266,67	-266,67	-466,67	-333,33	115,47
37	-266,67	-266,67	-466,67	-333,33	115,47
38	-266,67	-266,67	-466,67	-333,33	115,47
39	-266,67	-266,67	-466,67	-333,33	115,47
40	-266,67	-266,67	-466,67	-333,33	115,47

b) Resultados de retração autógena do traço Barchip-SAP

Barchip-SAP					
Idade (dias)	Deformação (μm)			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	-66,67	-22,22	38,49
8	0,00	0,00	-66,67	-22,22	38,49
9	-33,33	-66,67	-66,67	-55,56	19,25
10	-33,33	-66,67	-66,67	-55,56	19,25
11	-33,33	-66,67	-66,67	-55,56	19,25
12	-33,33	-66,67	-66,67	-55,56	19,25
13	-33,33	-100,00	-66,67	-66,67	33,33
14	-66,67	-100,00	-100,00	-88,89	19,25
15	-66,67	-100,00	-100,00	-88,89	19,25
16	-66,67	-133,33	-100,00	-100,00	33,33
17	-66,67	-133,33	-100,00	-100,00	33,33
18	-66,67	-133,33	-100,00	-100,00	33,33
19	-66,67	-133,33	-100,00	-100,00	33,33
20	-66,67	-133,33	-100,00	-100,00	33,33
21	-100,00	-133,33	-133,33	-122,22	19,25
22	-100,00	-133,33	-133,33	-122,22	19,25
23	-100,00	-133,33	-133,33	-122,22	19,25
24	-100,00	-133,33	-133,33	-122,22	19,25
25	-100,00	-133,33	-133,33	-122,22	19,25
26	-100,00	-133,33	-133,33	-122,22	19,25
27	-100,00	-200,00	-133,33	-144,44	50,92
28	-100,00	-200,00	-133,33	-144,44	50,92
29	-166,67	-200,00	-133,33	-166,67	33,33
30	-166,67	-200,00	-133,33	-166,67	33,33
31	-166,67	-200,00	-133,33	-166,67	33,33
32	-166,67	-200,00	-133,33	-166,67	33,33
33	-166,67	-200,00	-133,33	-166,67	33,33
34	-166,67	-200,00	-133,33	-166,67	33,33
35	-233,33	-200,00	-166,67	-200,00	33,33
36	-233,33	-200,00	-166,67	-200,00	33,33
37	-233,33	-200,00	-166,67	-200,00	33,33
38	-233,33	-200,00	-166,67	-200,00	33,33
39	-233,33	-200,00	-166,67	-200,00	33,33
40	-233,33	-200,00	-166,67	-200,00	33,33

c) Resultados de retração autógena do traço Referência

Referência					
Idade (dias)	Deformação (μm)			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-33,33	-33,33	0,00	-22,22	19,25
4	-66,67	-33,33	-133,33	-77,78	50,92
5	-66,67	-66,67	-133,33	-88,89	38,49
6	-66,67	-100,00	-133,33	-100,00	33,33
7	-100,00	-133,33	-166,67	-133,33	33,33
8	-100,00	-133,33	-166,67	-133,33	33,33
9	-66,67	-133,33	-166,67	-122,22	50,92
10	-66,67	-133,33	-166,67	-122,22	50,92
11	-66,67	-166,67	-166,67	-133,33	57,74
12	-66,67	-166,67	-166,67	-133,33	57,74
13	-66,67	-166,67	-166,67	-133,33	57,74
14	-66,67	-166,67	-300,00	-177,78	117,06
15	-66,67	-166,67	-300,00	-177,78	117,06
16	-66,67	-166,67	-300,00	-177,78	117,06
17	-100,00	-166,67	-300,00	-188,89	101,84
18	-100,00	-166,67	-300,00	-188,89	101,84
19	-100,00	-166,67	-300,00	-188,89	101,84
20	-100,00	-166,67	-300,00	-188,89	101,84
21	-133,33	-166,67	-366,67	-222,22	126,20
22	-133,33	-200,00	-366,67	-233,33	120,19
23	-133,33	-200,00	-366,67	-233,33	120,19
24	-133,33	-233,33	-366,67	-244,44	117,06
25	-133,33	-233,33	-366,67	-244,44	117,06
26	-133,33	-233,33	-366,67	-244,44	117,06
27	-133,33	-233,33	-366,67	-244,44	117,06
28	-133,33	-233,33	-400,00	-255,56	134,72
29	-166,67	-233,33	-400,00	-266,67	120,19
30	-166,67	-233,33	-400,00	-266,67	120,19
31	-166,67	-233,33	-400,00	-266,67	120,19
32	-166,67	-233,33	-400,00	-266,67	120,19
33	-166,67	-233,33	-400,00	-266,67	120,19
34	-166,67	-233,33	-400,00	-266,67	120,19
35	-166,67	-233,33	-500,00	-300,00	176,38
36	-166,67	-233,33	-500,00	-300,00	176,38
37	-200,00	-233,33	-500,00	-311,11	164,43
38	-200,00	-233,33	-500,00	-311,11	164,43
39	-200,00	-233,33	-500,00	-311,11	164,43
40	-200,00	-233,33	-500,00	-311,11	164,43

d) Resultados de retração autógena do traço Referência-SAP

Idade (dias)	Referência-SAP			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	-33,33	0,00	0,00	-11,11	19,25
7	-33,33	0,00	-33,33	-22,22	19,25
8	-33,33	0,00	-33,33	-22,22	19,25
9	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
10	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
11	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
12	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
13	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
14	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
15	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
16	-33,33	-33,33	-33,33	-33,33	0,00
17	-100,00	-66,67	-33,33	-66,67	33,33
18	-100,00	-66,67	-33,33	-66,67	33,33
19	-100,00	-66,67	-33,33	-66,67	33,33
20	-100,00	-66,67	-33,33	-66,67	33,33
21	-100,00	-66,67	-66,67	-77,78	19,25
22	-100,00	-66,67	-66,67	-77,78	19,25
23	-100,00	-66,67	-66,67	-77,78	19,25
24	-100,00	-66,67	-66,67	-77,78	19,25
25	-100,00	-66,67	-66,67	-77,78	19,25
26	-100,00	-66,67	-66,67	-77,78	19,25
27	-133,33	-66,67	-66,67	-88,89	38,49
28	-133,33	-66,67	-166,67	-122,22	50,92
29	-133,33	-66,67	-166,67	-122,22	50,92
30	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
31	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
32	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
33	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
34	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
35	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
36	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
37	-133,33	-100,00	-166,67	-133,33	33,33
38	-133,33	-100,00	-200,00	-144,44	50,92
39	-133,33	-100,00	-200,00	-144,44	50,92
40	-133,33	-100,00	-200,00	-144,44	50,92

e) Resultados de retração total do traço Barchip

Barchip					
Idade (dias)	Deformação (μm)			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	-166,67	-200,00	-100,00	-155,56	50,92
5	-166,67	-200,00	-100,00	-155,56	50,92
6	-166,67	-200,00	-100,00	-155,56	50,92
7	-166,67	-200,00	-100,00	-155,56	50,92
8	-166,67	-200,00	-100,00	-155,56	50,92
9	-233,33	-266,67	-300,00	-266,67	33,33
10	-233,33	-266,67	-300,00	-266,67	33,33
11	-233,33	-266,67	-300,00	-266,67	33,33
12	-233,33	-266,67	-366,67	-288,89	69,39
13	-233,33	-266,67	-366,67	-288,89	69,39
14	-233,33	-266,67	-366,67	-288,89	69,39
15	-266,67	-300,00	-366,67	-311,11	50,92
16	-266,67	-300,00	-366,67	-311,11	50,92
17	-266,67	-300,00	-366,67	-311,11	50,92
18	-266,67	-333,33	-400,00	-333,33	66,67
19	-266,67	-333,33	-400,00	-333,33	66,67
20	-266,67	-333,33	-400,00	-333,33	66,67
21	-266,67	-333,33	-400,00	-333,33	66,67
22	-366,67	-333,33	-400,00	-366,67	33,33
23	-366,67	-333,33	-400,00	-366,67	33,33
24	-366,67	-333,33	-400,00	-366,67	33,33
25	-366,67	-333,33	-400,00	-366,67	33,33
26	-366,67	-400,00	-400,00	-388,89	19,25
27	-366,67	-400,00	-433,33	-400,00	33,33
28	-366,67	-400,00	-433,33	-400,00	33,33
29	-400,00	-400,00	-433,33	-411,11	19,25
30	-400,00	-400,00	-433,33	-411,11	19,25
31	-400,00	-400,00	-433,33	-411,11	19,25
32	-400,00	-400,00	-433,33	-411,11	19,25
33	-400,00	-400,00	-433,33	-411,11	19,25
34	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33
35	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33
36	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33
37	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33
38	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33
39	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33
40	-400,00	-466,67	-433,33	-433,33	33,33

f) Resultados de retração total do traço Barchip-SAP

Barchip-SAP					
Idade (dias)	Deformação (μm)			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-133,33	-100,00	-300,00	-177,78	107,15
4	-133,33	-100,00	-300,00	-177,78	107,15
5	-166,67	-100,00	-300,00	-188,89	101,84
6	-233,33	-100,00	-300,00	-211,11	101,84
7	-333,33	-200,00	-300,00	-277,78	69,39
8	-333,33	-200,00	-300,00	-277,78	69,39
9	-333,33	-200,00	-300,00	-277,78	69,39
10	-333,33	-200,00	-300,00	-277,78	69,39
11	-366,67	-300,00	-300,00	-322,22	38,49
12	-366,67	-300,00	-366,67	-344,44	38,49
13	-366,67	-300,00	-366,67	-344,44	38,49
14	-400,00	-300,00	-366,67	-355,56	50,92
15	-400,00	-300,00	-366,67	-355,56	50,92
16	-400,00	-366,67	-366,67	-377,78	19,25
17	-400,00	-366,67	-366,67	-377,78	19,25
18	-400,00	-366,67	-400,00	-388,89	19,25
19	-433,33	-366,67	-400,00	-400,00	33,33
20	-433,33	-400,00	-400,00	-411,11	19,25
21	-433,33	-400,00	-400,00	-411,11	19,25
22	-433,33	-400,00	-400,00	-411,11	19,25
23	-433,33	-400,00	-400,00	-411,11	19,25
24	-433,33	-400,00	-466,67	-433,33	33,33
25	-433,33	-400,00	-466,67	-433,33	33,33
26	-466,67	-433,33	-466,67	-455,56	19,25
27	-466,67	-433,33	-466,67	-455,56	19,25
28	-466,67	-433,33	-466,67	-455,56	19,25
29	-466,67	-433,33	-466,67	-455,56	19,25
30	-466,67	-433,33	-466,67	-455,56	19,25
31	-466,67	-433,33	-466,67	-455,56	19,25
32	-466,67	-466,67	-533,33	-488,89	38,49
33	-466,67	-466,67	-533,33	-488,89	38,49
34	-466,67	-466,67	-533,33	-488,89	38,49
35	-500,00	-500,00	-533,33	-511,11	19,25
36	-500,00	-500,00	-533,33	-511,11	19,25
37	-500,00	-500,00	-533,33	-511,11	19,25
38	-533,33	-500,00	-533,33	-522,22	19,25
39	-600,00	-500,00	-533,33	-544,44	50,92
40	-600,00	-533,33	-533,33	-555,56	38,49

g) Resultados de retração total do traço Referência

Idade (dias)	Referência			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	-	
2	-100,00	0,00	0,00	-33,33	57,74
3	-100,00	-233,33	-200,00	-177,78	69,39
4	-166,67	-233,33	-200,00	-200,00	33,33
5	-166,67	-233,33	-200,00	-200,00	33,33
6	-166,67	-233,33	-266,67	-222,22	50,92
7	-166,67	-233,33	-266,67	-222,22	50,92
8	-166,67	-300,00	-300,00	-255,56	76,98
9	-233,33	-300,00	-300,00	-277,78	38,49
10	-233,33	-333,33	-333,33	-300,00	57,74
11	-233,33	-333,33	-333,33	-300,00	57,74
12	-233,33	-333,33	-333,33	-300,00	57,74
13	-233,33	-333,33	-333,33	-300,00	57,74
14	-233,33	-333,33	-333,33	-300,00	57,74
15	-233,33	-333,33	-333,33	-300,00	57,74
16	-233,33	-400,00	-366,67	-333,33	88,19
17	-233,33	-400,00	-366,67	-333,33	88,19
18	-333,33	-400,00	-366,67	-366,67	33,33
19	-333,33	-400,00	-366,67	-366,67	33,33
20	-333,33	-433,33	-400,00	-388,89	50,92
21	-333,33	-433,33	-400,00	-388,89	50,92
22	-400,00	-433,33	-400,00	-411,11	19,25
23	-400,00	-433,33	-400,00	-411,11	19,25
24	-400,00	-433,33	-433,33	-422,22	19,25
25	-400,00	-433,33	-433,33	-422,22	19,25
26	-400,00	-433,33	-433,33	-422,22	19,25
27	-400,00	-433,33	-433,33	-422,22	19,25
28	-400,00	-433,33	-433,33	-422,22	19,25
29	-433,33	-466,67	-433,33	-444,44	19,25
30	-433,33	-466,67	-466,67	-455,56	19,25
31	-433,33	-466,67	-466,67	-455,56	19,25
32	-433,33	-466,67	-466,67	-455,56	19,25
33	-433,33	-466,67	-466,67	-455,56	19,25
34	-433,33	-466,67	-466,67	-455,56	19,25
35	-466,67	-500,00	-500,00	-488,89	19,25
36	-466,67	-500,00	-500,00	-488,89	19,25
37	-466,67	-500,00	-500,00	-488,89	19,25
38	-466,67	-500,00	-500,00	-488,89	19,25
39	-466,67	-500,00	-500,00	-488,89	19,25
40	-466,67	-500,00	-500,00	-488,89	19,25

h) Resultados de retração total do traço Referência-SAP

Referência-SAP					
Idade (dias)	Deformação (μm)			Deformação média (μm)	Desvio padrão
	Espécime 1	Espécime 2	Espécime 3		
1	-	-	-	0	0
2	-100,00	0,00	0,00	-33,33	57,74
3	-100,00	-100,00	-133,33	-111,11	19,25
4	-166,67	-100,00	-133,33	-133,33	33,33
5	-166,67	-100,00	-133,33	-133,33	33,33
6	-166,67	-100,00	-166,67	-144,44	38,49
7	-200,00	-100,00	-200,00	-166,67	57,74
8	-200,00	-166,67	-266,67	-211,11	50,92
9	-200,00	-166,67	-266,67	-211,11	50,92
10	-200,00	-166,67	-266,67	-211,11	50,92
11	-266,67	-166,67	-266,67	-233,33	57,74
12	-266,67	-166,67	-266,67	-233,33	57,74
13	-266,67	-166,67	-266,67	-233,33	57,74
14	-266,67	-200,00	-300,00	-255,56	50,92
15	-266,67	-200,00	-300,00	-255,56	50,92
16	-266,67	-200,00	-300,00	-255,56	50,92
17	-266,67	-266,67	-333,33	-288,89	38,49
18	-266,67	-266,67	-366,67	-300,00	57,74
19	-266,67	-266,67	-366,67	-300,00	57,74
20	-300,00	-266,67	-366,67	-311,11	50,92
21	-366,67	-266,67	-366,67	-333,33	57,74
22	-366,67	-266,67	-433,33	-355,56	83,89
23	-366,67	-266,67	-433,33	-355,56	83,89
24	-366,67	-266,67	-433,33	-355,56	83,89
25	-366,67	-266,67	-433,33	-355,56	83,89
26	-366,67	-333,33	-433,33	-377,78	50,92
27	-366,67	-333,33	-433,33	-377,78	50,92
28	-400,00	-333,33	-433,33	-388,89	50,92
29	-400,00	-333,33	-466,67	-400,00	66,67
30	-400,00	-333,33	-466,67	-400,00	66,67
31	-433,33	-333,33	-466,67	-411,11	69,39
32	-433,33	-333,33	-466,67	-411,11	69,39
33	-500,00	-333,33	-466,67	-433,33	88,19
34	-500,00	-400,00	-500,00	-466,67	57,74
35	-500,00	-400,00	-500,00	-466,67	57,74
36	-500,00	-400,00	-500,00	-466,67	57,74
37	-500,00	-400,00	-500,00	-466,67	57,74
38	-500,00	-400,00	-500,00	-466,67	57,74
39	-500,00	-400,00	-500,00	-466,67	57,74
40	-533,33	-400,00	-500,00	-477,78	69,39

i) Resultados de retração por secagem do traço Barchip

Idade (dias)	Barchip		
	Deformação média (μm)		
	Total	Autógena	Secagem
1,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	-11,11	11,11
3,00	0,00	-22,22	22,22
4,00	-155,56	-122,22	-33,33
5,00	-155,56	-133,33	-22,22
6,00	-155,56	-133,33	-22,22
7,00	-155,56	-133,33	-22,22
8,00	-155,56	-144,44	-11,11
9,00	-266,67	-155,56	-111,11
10,00	-266,67	-155,56	-111,11
11,00	-266,67	-155,56	-111,11
12,00	-288,89	-155,56	-133,33
13,00	-288,89	-155,56	-133,33
14,00	-288,89	-177,78	-111,11
15,00	-311,11	-177,78	-133,33
16,00	-311,11	-177,78	-133,33
17,00	-311,11	-188,89	-122,22
18,00	-333,33	-188,89	-144,44
19,00	-333,33	-200,00	-133,33
20,00	-333,33	-200,00	-133,33
21,00	-333,33	-233,33	-100,00
22,00	-366,67	-244,44	-122,22
23,00	-366,67	-255,56	-111,11
24,00	-366,67	-255,56	-111,11
25,00	-366,67	-255,56	-111,11
26,00	-388,89	-255,56	-133,33
27,00	-400,00	-255,56	-144,44
28,00	-400,00	-255,56	-144,44
29,00	-411,11	-277,78	-133,33
30,00	-411,11	-277,78	-133,33
31,00	-411,11	-300,00	-111,11
32,00	-411,11	-300,00	-111,11
33,00	-411,11	-300,00	-111,11
34,00	-433,33	-322,22	-111,11
35,00	-433,33	-322,22	-111,11
36,00	-433,33	-333,33	-100,00
37,00	-433,33	-333,33	-100,00
38,00	-433,33	-333,33	-100,00
39,00	-433,33	-333,33	-100,00
40,00	-433,33	-333,33	-100,00

j) Resultados de retração por secagem do traço Barchip-SAP

Idade (dias)	Barchip + SAP		
	Deformação média (μm)		
	Total	Autógena	Secagem
1,00	0,00	0,00	0,00
2,00	0,00	0,00	0,00
3,00	-177,78	0,00	-177,78
4,00	-177,78	0,00	-177,78
5,00	-188,89	0,00	-188,89
6,00	-211,11	0,00	-211,11
7,00	-277,78	-22,22	-255,56
8,00	-277,78	-22,22	-255,56
9,00	-277,78	-55,56	-222,22
10,00	-277,78	-55,56	-222,22
11,00	-322,22	-55,56	-266,67
12,00	-344,44	-55,56	-288,89
13,00	-344,44	-66,67	-277,78
14,00	-355,56	-88,89	-266,67
15,00	-355,56	-88,89	-266,67
16,00	-377,78	-100,00	-277,78
17,00	-377,78	-100,00	-277,78
18,00	-388,89	-100,00	-288,89
19,00	-400,00	-100,00	-300,00
20,00	-411,11	-100,00	-311,11
21,00	-411,11	-122,22	-288,89
22,00	-411,11	-122,22	-288,89
23,00	-411,11	-122,22	-288,89
24,00	-433,33	-122,22	-311,11
25,00	-433,33	-122,22	-311,11
26,00	-455,56	-122,22	-333,33
27,00	-455,56	-144,44	-311,11
28,00	-455,56	-144,44	-311,11
29,00	-455,56	-166,67	-288,89
30,00	-455,56	-166,67	-288,89
31,00	-455,56	-166,67	-288,89
32,00	-488,89	-166,67	-322,22
33,00	-488,89	-166,67	-322,22
34,00	-488,89	-166,67	-322,22
35,00	-511,11	-200,00	-311,11
36,00	-511,11	-200,00	-311,11
37,00	-511,11	-200,00	-311,11
38,00	-522,22	-200,00	-322,22
39,00	-544,44	-200,00	-344,44
40,00	-555,56	-200,00	-355,56

k) Resultados de retração por secagem do traço Referência

Idade (dias)	Referência		
	Deformação média (μm)		
	Total	Autógena	Secagem
1,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-33,33	0,00	-33,33
3,00	-177,78	-22,22	-155,56
4,00	-222,22	-77,78	-144,44
5,00	-222,22	-88,89	-133,33
6,00	-244,44	-100,00	-144,44
7,00	-255,56	-133,33	-122,22
8,00	-322,22	-133,33	-188,89
9,00	-322,22	-122,22	-200,00
10,00	-344,44	-122,22	-222,22
11,00	-355,56	-133,33	-222,22
12,00	-355,56	-133,33	-222,22
13,00	-355,56	-133,33	-222,22
14,00	-355,56	-177,78	-177,78
15,00	-355,56	-177,78	-177,78
16,00	-388,89	-177,78	-211,11
17,00	-388,89	-188,89	-200,00
18,00	-433,33	-188,89	-244,44
19,00	-433,33	-188,89	-244,44
20,00	-455,56	-188,89	-266,67
21,00	-466,67	-222,22	-244,44
22,00	-466,67	-233,33	-233,33
23,00	-466,67	-233,33	-233,33
24,00	-477,78	-244,44	-233,33
25,00	-488,89	-244,44	-244,44
26,00	-488,89	-244,44	-244,44
27,00	-488,89	-244,44	-244,44
28,00	-488,89	-255,56	-233,33
29,00	-500,00	-266,67	-233,33
30,00	-511,11	-266,67	-244,44
31,00	-533,33	-266,67	-266,67
32,00	-533,33	-266,67	-266,67
33,00	-533,33	-266,67	-266,67
34,00	-533,33	-266,67	-266,67
35,00	-566,67	-300,00	-266,67
36,00	-566,67	-300,00	-266,67
37,00	-566,67	-311,11	-255,56
38,00	-566,67	-311,11	-255,56
39,00	-566,67	-311,11	-255,56
40,00	-566,67	-311,11	-255,56

l) Resultados de retração por secagem do traço Referência-SAP

Idade (dias)	Referência + SAP		
	Deformação média (μm)		
	Total	Autógena	Secagem
1,00	0,00	0,00	0,00
2,00	-33,33	0,00	-33,33
3,00	-111,11	0,00	-111,11
4,00	-133,33	0,00	-133,33
5,00	-133,33	0,00	-133,33
6,00	-144,44	-11,11	-133,33
7,00	-166,67	-22,22	-144,44
8,00	-211,11	-22,22	-188,89
9,00	-211,11	-33,33	-177,78
10,00	-211,11	-33,33	-177,78
11,00	-233,33	-33,33	-200,00
12,00	-233,33	-33,33	-200,00
13,00	-233,33	-33,33	-200,00
14,00	-255,56	-33,33	-222,22
15,00	-255,56	-33,33	-222,22
16,00	-255,56	-33,33	-222,22
17,00	-288,89	-66,67	-222,22
18,00	-300,00	-66,67	-233,33
19,00	-300,00	-66,67	-233,33
20,00	-311,11	-66,67	-244,44
21,00	-333,33	-77,78	-255,56
22,00	-355,56	-77,78	-277,78
23,00	-355,56	-77,78	-277,78
24,00	-355,56	-77,78	-277,78
25,00	-355,56	-77,78	-277,78
26,00	-377,78	-77,78	-300,00
27,00	-377,78	-88,89	-288,89
28,00	-388,89	-122,22	-266,67
29,00	-400,00	-122,22	-277,78
30,00	-400,00	-133,33	-266,67
31,00	-411,11	-133,33	-277,78
32,00	-411,11	-133,33	-277,78
33,00	-433,33	-133,33	-300,00
34,00	-466,67	-133,33	-333,33
35,00	-466,67	-133,33	-333,33
36,00	-466,67	-133,33	-333,33
37,00	-466,67	-133,33	-333,33
38,00	-466,67	-144,44	-322,22
39,00	-466,67	-144,44	-322,22
40,00	-477,78	-144,44	-333,33

APÊNDICE D – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Traço	Idade (dias)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à compressão média (MPa)	Desvio padrão
Barchip	7	58,10	55,11	2,36
	7	52,80		
	7	53,70		
	7	55,82		
	14	64,47	61,15	3,47
	14	57,44		
	14	63,71		
	14	58,97		
	28	66,15	64,70	1,24
	28	64,09		
	28	63,34		
	28	65,22		
Barchip-SAP	7	48,00	49,13	2,33
	7	49,57		
	7	52,17		
	7	46,77		
	14	49,78	51,56	1,32
	14	52,10		
	14	52,89		
	14	51,46		
	28	52,71	51,93	1,09
	28	52,18		
	28	52,49		
	28	50,32		
Referência	7	53,07	56,21	2,67
	7	55,08		
	7	59,12		
	7	57,56		
	14	54,48	55,44	1,51
	14	53,83		
	14	56,71		
	14	56,74		
	28	61,76	63,28	1,07
	28	63,63		
	28	64,25		
	28	63,49		
Referência-SAP	7	43,13	41,85	2,02
	7	40,03		
	7	44,01		
	7	40,23		
	14	46,67	47,84	1,23
	14	46,87		
	14	48,95		
	14	48,85		
	28	53,05	51,08	2,13
	28	48,07		
	28	51,33		
	28	51,86		

APÊNDICE E – RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

a) Resultados de resistência à tração na flexão

Traço	Idade (dias)	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à tração na flexão média (MPa)	Desvio padrão		
Barchip	7	7,08	6,80	0,25		
	7	6,74				
	7	6,59				
	Barchip-SAP	14	6,19	6,51	0,28	
		14	6,74			
		14	6,59			
		Referência	28	6,87	6,81	0,05
			28	6,79		
			28	6,76		
Barchip-SAP	7	6,24	5,75	0,44		
	7	5,38				
	7	5,63				
	Referência	14	5,10	5,59	0,58	
		14	5,45			
		14	6,23			
		Referência	28	6,69	6,23	0,44
			28	6,15		
			28	5,83		
Referência-SAP	7	6,68	6,18	0,51		
	7	5,66				
	7	6,19				
	Referência	14	6,88	6,50	0,33	
		14	6,32			
		14	6,30			
		Referência	28	6,82	6,90	0,57
			28	6,38		
			28	7,51		
Referência-SAP	7	5,87	5,56	0,48		
	7	5,01				
	7	5,82				
	Referência	14	6,95	6,19	0,82	
		14	6,30			
		14	5,33			
		Referência	28	5,72	5,67	0,69
			28	6,33		
			28	4,95		

b) Resultados de tensão residual encontrados no ensaio de resistência à tração na flexão

Traço	Idade (dias)	Tensão residual (MPa)	Tensão residual média (MPa)	Desvio padrão	
Barchip	7	1,60	1,82	0,22	
	7	1,83			
	7	2,03			
	14	14	1,59	1,63	0,15
		14	1,80		
		14	1,50		
	28	28	1,85	1,71	0,15
		28	1,55		
		28	1,73		
Barchip-SAP	7	1,86	1,94	0,09	
	7	1,93			
	7	2,04			
	14	14	2,13	2,04	0,10
		14	1,93		
		14	2,04		
	28	28	2,05	2,09	0,40
		28	2,50		
		28	1,71		

APÊNDICE F – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE ESTÁTICO

Traço	Idade (dias)	Módulo de elasticidade (MPa)	Módulo de elasticidade médio (MPa)	Desvio padrão	
Barchip	7	56,10	54,85	1,26	
	7	54,86			
	7	53,59			
	14	14	59,82	56,09	3,29
		14	54,86		
		14	53,59		
	28	28	75,81	68,86	10,54
		28	56,73		
		28	74,05		
Barchip-SAP	7	48,23	46,18	2,57	
	7	43,29			
	7	47,01			
	14	14	58,37	58,59	7,69
		14	51,01		
		14	66,38		
	28	28	53,88	50,13	3,33
		28	47,54		
		28	48,97		
Referência	7	52,98	45,02	6,91	
	7	40,67			
	7	41,41			
	14	14	57,51	56,87	1,04
		14	57,43		
		14	55,66		
	28	28	54,09	61,47	6,42
		28	65,86		
		28	64,45		
Referência-SAP	7	50,39	49,63	0,92	
	7	49,91			
	7	48,60			
	14	14	58,08	58,72	5,95
		14	64,96		
		14	53,12		
	28	28	52,04	51,23	2,07
		28	48,88		
		28	52,77		

APÊNDICE G – RESULTADOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DINÂMICO

a) Resultados de módulo de elasticidade dinâmico por impacto

Traço	ρ (g/cm ³)	Ecd (GPa)	Ecd,med (GPa)	Desvio Padrão	Eci (GPa)	Eci,med (GPa)	Desvio Padrão
Barchip	2,48	50,93			42,33		
	2,45	49,52	50,19	0,65	41,13	41,88	0,65
	2,43	50,13			42,19		
Barchip-SAP	2,45	47,83			39,25		
	2,42	46,10	47,42	1,07	37,64	38,85	1,07
	2,46	48,33			39,66		
Referência	2,48	50,37			41,56		
	2,45	49,87	49,68	0,73	41,56	41,14	0,73
	2,45	48,79			40,30		
Referência-SAP	2,41	46,33			38,08		
	2,45	49,52	48,66	2,01	41,20	40,37	2,01
	2,45	50,13			41,84		

b) Resultados de módulo de elasticidade dinâmico ultrassônico

Traço	ρ (g/cm ³)	Ecd (GPa)	Ecd,med (GPa)	Desvio Padrão	Eci (GPa)	Eci,med (GPa)	Desvio Padrão
Barchip	2,48	50,93			42,33		
	2,45	49,52	50,19	0,71	41,13	41,88	0,65
	2,43	50,13			42,19		
Barchip-SAP	2,45	47,83			39,25		
	2,42	46,10	47,42	1,17	37,64	38,85	1,07
	2,46	48,33			39,66		
Referência	2,48	50,37			41,56		
	2,45	49,87	49,68	0,80	41,56	41,14	0,73
	2,45	48,79			40,30		
Referência-SAP	2,41	46,33			38,08		
	2,45	49,52	48,66	2,04	41,20	40,37	2,01
	2,45	50,13			41,84		