

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

NICOLAS JORGE VIANNA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO
REFORÇADO COM MICROFIBRAS**

**CAMPINAS
2023**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM SISTEMAS EM
INFRAESTRUTURA URBANA
NICOLAS JORGE VIANNA

ESTUDO EXPERIMENTAL DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO
REFORÇADO COM MICROFIBRAS

Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Sistemas de Infraestrutura Urbana, da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Nádia Cazarim da Silva Forti
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho

Ficha catalográfica elaborada por Adriane Elane Borges de Carvalho CRB 8/9313
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

620.136 Vianna, Nicolas Jorge
V614e

Estudo experimental da retração por secagem do concreto reforçado com microfibras. / Nicolas Jorge Vianna. - Campinas: PUC-Campinas, 2023.

113 f.

Orientador: Nádia Cazarim da Silva Forti; Coorientador: Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila .

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2023.

Inclui bibliografia.

1. Concreto. 2. Controle de qualidade - Concreto. 3. Fibra. I. Forti, Nádia Cazarim da Silva. II. , Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila III. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. IV. Título.

23. ed. CDD 620.136

NICOLAS JORGE VIANNA

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA RETRAÇÃO POR
SECAGEM DO CONCRETO REFORÇADO COM
MICROFIBRAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana. Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Nádia Cazarim da Silva Forti.

Co-orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Ana Elisabete Paganelli G. de A. Jacintho.

Dissertação defendida e aprovada em 24 de fevereiro de 2023 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



Profa. Dra. Nádia Cazarim da Silva Forti
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



Dra. Renata Monte
Universidade de São Paulo - USP

Dedico este trabalho de pesquisa
aos meus queridos pais, Simone Vianna e Dario Bernardes Paiva,
pelo amor incondicional e incentivo à busca dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Após uma árdua caminhada, repleta de conhecimento e crescimento pessoal e profissional, o seu início se evidencia incontestável.

Agradeço primeiramente a todos os professores da Faculdade de Engenharia Civil e do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, pelos ensinamentos, experiências, orientações e a possibilidade de conhecer este mundo acadêmico.

Gostaria de dedicar um agradecimento especial à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Nádia Cazarim da Silva Forti, pela confiança depositada em mim para o desenvolvimento deste trabalho. Gostaria de expressar a minha sincera gratidão por todos os ensinamentos, conselhos e apoio. A minha jornada foi abençoada com a sua presença, muito obrigado.

À Prof. Dr^a. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho pelo respeito, disponibilidade, incentivo e orientação.

Ao Igor Citrângulo Pereira, Welington Sousa Mendes e Fernando Barros Prastes Abu Kamel, funcionários do laboratório de Materiais e Estruturas da PUC-Campinas, pelo apoio nas atividades desenvolvidas neste programa experimental.

A todos os funcionários da PUC-Campinas, os quais compõem e ajudam a manter a estrutura da universidade.

Ao Prof. Dr. Marco Antonio Carnio pela doação dos anéis de aço utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Me. João Batista Lamari Palma e Silva pelo apoio na instrumentação dos anéis de aço e questões envolvendo a área de extensometria.

Ao Sr. Fábio Donizete Correa, Sr. Márcio Rogério Pomim, Sr. Otávio Augusto Brito Laranjeira e Sr. Eduardo Ramiro pela ajuda na confecção das 'caixas de ensaio' desenvolvidas neste estudo.

Ao Sr. Alberto Silva, da MC-Bauchemie, pela doação do aditivo adotado neste estudo.

Ao Eng. Marcelo Munhoz Morás e a todos da Sarom: Consultoria em Engenharia, pelo apoio, consultoria e mentoria na área de tecnologia do concreto.

Ao Sr. Bruno Clemente Morás, pela amizade, companheirismo, apoio e incentivo em diversos momentos.

À Sra. Tainá Lidiani Taboga, pelo amor, companhia, carinho e paciência durante essa minha jornada.

Aos meus pais, Sra. Simone Vianna e Sr. Dario Bernardes Paiva, por todo amor, carinho, ajuda, disposição, conselhos e incentivos ao longo de toda a minha jornada. Sou grato por tê-los em minha vida, muito obrigado.

Agradeço a toda a minha família, que sempre me apoiaram, estiveram ao meu lado e contribuíram para o meu desenvolvimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

A todos que, diretamente ou indiretamente, me acompanharam nesta jornada e contribuíram de alguma forma para a minha formação, o meu muito obrigado.

“It often requires more courage to dare
to do right than to fear to do wrong”.

Abraham Lincoln
(1809-1865)

RESUMO

VIANNA, Nicolas Jorge. *Estudo experimental da retração por secagem do concreto reforçado com microfibras*. 2022. 113f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

A eficiência e durabilidade das estruturas em concreto são associadas ao controle da qualidade do concreto, sendo que quando negligenciada, resultar-se-á em diversas manifestações patológicas. Desta maneira, ressalta-se o fenômeno da fissuração, o qual pode comprometer tanto a estética quanto a durabilidade da estrutura, visto que propiciam a entrada de água e agentes nocivos e reduzem a capacidade de carregamento do concreto. Com ênfase nas idades iniciais, as fissuras são resultado da sobreposição das tensões causadas pelos efeitos térmicos e pela retração. Ressalta-se que apenas o fenômeno da retração não incorreria em dano ao elemento, como fissuração. Quando associadas às restrições [externas e internas], tensões de tração são induzidas no material, resultando na fissuração quando ultrapassam a sua resistência à tração. Nas idades iniciais, isso se evidencia particularmente importante, pois as propriedades do concreto ainda estão em desenvolvimento. Logo, controlar a formação e abertura das fissuras é imprescindível para garantir a durabilidade e vida útil das estruturas. Dentre as alternativas, a adição de fibras à matriz cimentícia se destaca como uma tecnologia eficiente ao controle da fissuração por retração. A fim de determinar a eficácia da adição de fibras no processo de fissuração decorrente da retração [por secagem], destaca-se a metodologia proposta pela ASTM C1581/C1581M (2018), cujo ensaio avalia o potencial de fissuração do concreto quando restringido de se deformar livremente. Com isso, este trabalho contempla uma pesquisa experimental que teve por objetivo avaliar a eficácia das microfibras de poliamida e vidro álcali-resistente na redução do potencial de fissuração devido à retração por secagem restringida, conforme a normativa ASTM C1581/C1581M (2018). No total, cinco dosagens foram avaliadas: concreto simples (CS) e as demais em concreto reforçado com microfibras de poliamida e vidro álcali-resistente. Ambas as microfibras foram avaliadas individualmente em duas dosagens – 0,60 e 1,20 kg/m³ do volume de concreto. Como resultado, verificou-se que a adição de microfibras não alterou significativamente a idade de fissuração do compósito. A diferença mais notória ocorreu para a amostra incorporando microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR/1,2), na dosagem de 1,20 kg/m³ do volume de concreto, cuja idade de fissuração foi aos 12,5 dias, quatro dias após ao CS. Entretanto, a classificação de todas as dosagens ficaram compreendidas entre as faixas de potencial 'Alto' ou 'Moderado-alto' de fissuração. Entretanto, o padrão de fissuração nos compósitos reforçados com microfibras se diferiram da amostra referência, apresentando fissuras de menores dimensões e descontínuas. Em adição, esse fator se mostrou mais acentuado com o aumento do teor das microfibras. A dosagem CRFV-AR/1,2 se destacou mais eficiente neste estudo, visto a redução considerável na abertura das fissuras, além de retardar o seu aparecimento. Portanto, a análise da fissuração como complemento ao ensaio do anel se mostrou imprescindível para averiguar o efeito da adição de microfibras no concreto. Conclui-se que, apesar da adição de microfibras não alterar o potencial de fissuração do compósito, a sua eficiência está relacionada à redução da abertura de fissuras, cujo parâmetro contribui para a durabilidade e a vida útil das estruturas em concreto.

Palavras-chave: Retração por secagem; Ensaio de retração restringida; Microfibras.

ABSTRACT

VIANNA, Nicolas Jorge. *Experimental study of drying shrinkage of microfiber reinforced concrete*. 2022. 113f. Dissertation (Master in Urban Infrastructure Systems) – Programa de Pós-graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2022.

Durability and serviceability of structural elements built with concrete depend directly on quality control of concrete, and if they are neglected, several pathologies are associated. Cracking in concrete structures is an unsettling pathological manifestation that might compromised either its esthetic or indicate a lack of durability. As consequence, cracks allow water and other chemical agents to penetrate into the core and reduce load-carrying capacity of concrete. At early-ages, the superposition of thermal and shrinkage stresses leads to cracking. It should be emphasized that the free shrinkage would not damage the composite. Associated to restraints, both external and internal, the development of cracks occurs when the internal stresses exceed the material tensile strength. Different factors are involved in the cracking phenomenon. Concrete exhibits a low tensile strength at early-ages, thus the risk of cracking shall be seriously considered. In order to assure durability and serviceability requirements, it is crucial control cracks and limit crack-widths. The addition of fibers within the cement matrix is an effective method to control shrinkage cracking. The efficiency of fibers on cracking can be accessed accordingly to methodology proposed by ASTM C1581/C1581M (2018). This test method evaluates the potential for cracking of concrete due to drying shrinkage under restrained conditions. Hence, an experimental study was conducted to investigate the efficiency of polyamide (nylon 6.6) and alkali-resistant glass microfibers on the potential for cracking of conventional concrete at early-ages due to restrained drying shrinkage. The ring test methodology stablished by ASTM C1581/C1581 (2018) was adopted in order to attain the objective stated. In total, five dosages have been studied – plain concrete (PC) and the remaining in alkali-resistant glass and polyamide microfiber reinforced concrete. Both microfibers were individually tested on a dosage of 0,60 and 1,20 kg/m³ of volume of concrete. As result, it has been verified that the microfibers reinforced concrete reached an age at cracking similar of the plain concrete. In comparison with the PC, the most noticeable difference on the age at cracking was verified for the sample incorporating 1,20 kg/m³ of alkali-resistant glass microfiber (AR-GFRC/1,2), which has been delayed in four days. However, all specimens have been classified in a range of High or Moderate-high potential for cracking. The cracking pattern differed between the microfibers reinforced concrete and the PC. In general, the addition of microfibers promoted hairline cracks – narrower and discontinuous cracks along its extension. It has also been more pronounced with the increase of fiber content. In this study, the AR-GFRC/1,2 dosage was the most efficient in reducing crack-width and delaying the age at cracking. Therefore, the cracking analysis has been shown fundamental as a complement to the standard to investigate the effect of microfibers on concrete. In conclusion, even though the microfibers did not modify the potential for cracking, their efficiency is related in controlling crack development and limiting crack-width, which parameter is fundamental for increasing durability and serviceability in concrete structures.

Key words: Drying shrinkage; Restrained Shrinkage Test; Microfibers.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do ensaio do anel entre as normativas citadas	40
Tabela 2: Faixa de propriedades (genéricas) das fibras.....	43
Tabela 3: Estudos do desempenho das microfibras [comparado à amostra referência] quanto à idade de fissuração dos anéis no ensaio de retração por secagem restringida	48
Tabela 4: Ensaio para a caracterização do concreto no estado endurecido.....	55
Tabela 5: Propriedades dos agregados analisados – massa específica e absorção de água	56
Tabela 6: Classificação das fibras poliméricas e de vidro álcali-resistente	57
Tabela 7: Propriedades das fibras.....	58
Tabela 8: Consumo, em [kg/m ³], dos insumos para a confecção de cada dosagem	58
Tabela 9: Normativas e quantidade de exemplares para ensaios de caracterização do concreto no estado plástico e endurecido	59
Tabela 10: Abatimento do tronco de cone para os distintos traços	60
Tabela 11: Ensaio de caracterização mecânica para as dosagens avaliadas	61
Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) das propriedades do concreto no estado endurecido	62
Tabela 13: Classificação do potencial de fissuração	69
Tabela 14: Resultados inerentes às curvas de 'Deformação <i>versus</i> Tempo' do ensaio de retração restringida para cada compósito	78
Tabela 15: Análise de variância (ANOVA) aplicado nas variáveis dependentes do ensaio de retração por secagem restringida	78
Tabela 16: Resultados do Teste LSD de Fisher – verificação da variável 'Idade de fissuração'	80
Tabela 17: Potencial de fissuração das dosagens no ensaio de retração restringida	83
Tabela 18: Abertura média das fissuras nos pontos indicados.....	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos pisos industriais	23
Quadro 2: Nível de influência de fatores nas componentes individuais da retração .	29
Quadro 3: Aplicação de ensaios de retração em concretos reforçados com fibras ...	37
Quadro 4: Tecnologias para mitigar a fissuração por retração	42

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Desenvolvimento da curva 'Deformação do anel de aço interno' (a) nas condições do ambiente teste (b)	66
Gráfico 2: Regressão linear da curva ' Δ Deformação <i>versus</i> $\sqrt{\Delta}$ Tempo'	70
Gráfico 3: Curvas 'Deformação <i>versus</i> Tempo' para o Concreto Simples (CS).....	73
Gráfico 4: Curvas 'Deformação <i>versus</i> Tempo' para o concreto reforçado com microfibras de poliamida (CRFPA), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$	74
Gráfico 5: Curvas 'Deformação <i>versus</i> Tempo' para o concreto reforçado com microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$	74
Gráfico 6: Curvas médias 'Deformação <i>versus</i> Tempo'	76
Gráfico 7: Análise <i>boxplot</i> da deformação máxima nas dosagens	79
Gráfico 8: Análise <i>boxplot</i> da idade de fissuração nas dosagens.....	81
Gráfico 9: Análise das amostras conforme as variáveis 'Idade de fissuração' e 'Deformação máxima'	82
Gráfico 10: Análise da abertura de fissuras.....	91
Gráfico 11: Deformação <i>versus</i> tempo para o concreto simples exposto no (a) Ambiente teste I; e (b) Ambiente teste II	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fissuração em elementos de concreto.....	25
Figura 2: Esquemática da fissuração devido à restrição da retração	26
Figura 3: Influência no processo de fissuração devido a interação entre a fluência e retração	28
Figura 4: Relação entre a retração química e autógena.....	31
Figura 5: Ensaio de retração química em materiais cimentícios, sendo: (a) Procedimento A; e (b) Procedimento B	35
Figura 6: Aparato para medição da deformação devido à retração autógena (dilatômetro)	36
Figura 7: Pórtico para ensaio de variação dimensional	38
Figura 8: Molde para ensaio de retração plástica.....	39
Figura 9: Ilustração das tensões de tração desenvolvidas ao longo da seção transversal no ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido	40
Figura 10: Modo de fratura e ilustração da fissura fictícia no (a) concreto simples; e (b) concreto reforçado com fibras	45
Figura 11: Desenho e diagrama esquemático da interação das micro- e macrofibras no desenvolvimento de fissuras	46
Figura 12: Desenvolvimento da tensão e energia acústica acumulada, em função do tempo, no (a) concreto simples; e (b) concreto reforçado com fibras.....	47
Figura 13: Curvas 'Deformação específica <i>versus</i> Idade' para o ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido.....	50
Figura 14: Comparação do padrão de fissura (ilustração binária) entre a amostra referência com àquelas contendo microfibras de polipropileno, macrofibras de poliolefina, fibras de aço.....	52
Figura 15: Proposta metodológica desta dissertação.....	53
Figura 16: Detalhamento dos ensaios experimentais adotados para cada concretagem	54
Figura 17: Curvas granulométricas do (a) agregado graúdo; e (b) agregado miúdo.....	55
Figura 18: Ilustração das microfibras de polipropileno e poliamida avaliadas neste estudo	57
Figura 19: Dimensões do corpo de prova para o ensaio de retração pelo método do anel restringido.....	62

Figura 20: Fixação dos anéis de aço com parafusos, sendo (a) anel externo; e (b) anel interno	63
Figura 21: Procedimento de instalação dos extensômetros	63
Figura 22: Conexão do extensômetro no cabo de comunicação e especificação do componente.....	64
Figura 23: Detalhe genérico (a) conexão entre os componentes e os cabos de extensão; e (b) conexão entre os cabos de extensão ao sistema de aquisição de dados	64
Figura 24: Ilustração da 'caixa de ensaio', sendo: (a) interior; e (b) isolada	65
Figura 25: (a) processo de cura úmida no anel de concreto; e (b) aplicação da parafina no topo do corpo de prova.....	68
Figura 26: Exemplo genérico do desenvolvimento da curva deformação do aço no ensaio de retração por secagem restringida	68
Figura 27: (a) Microscópio digital portátil; (b) Régua de calibração.....	70
Figura 28: Metodologia aplicada para processar as imagens em binário	71
Figura 29: Procedimento de calibração para aferir a abertura de fissuras	72
Figura 30: Ilustração na metodologia de análise da fissuração	72
Figura 31: Registro da fissuração nas amostras de concreto simples (CS)	84
Figura 32: Registro da fissuração nas amostras de concreto reforçado com microfibras de poliamida (CRFPA), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$	85
Figura 33: Registro da fissuração nas amostras de concreto reforçado com microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$	85
Figura 34: Comparação da fissura na amostra CS – Anel 03 (pontos P01 e P04)....	87
Figura 35: Comparação da fissura na amostra CRFV-AR/1,2 – Anel 02 (pontos P01 e P06).....	87
Figura 36: Fissuração radial na amostra 'CS – Anel 02'	89
Figura 37: Configuração do Ambiente Teste I	102
Figura 38: Conexão dos cabos de comunicação no sistema de aquisição de dados, sendo (a) com os componentes próximos ao HBM; e (b) através das extensões ...	104
Figura 39: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e ' <i>Net strain versus Elapsed time</i> ^{1/2} ' (direita) – Dosagem CS.....	106
Figura 40: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e ' <i>Net strain versus Elapsed time</i> ^{1/2} ' (direita) – Dosagem CRFPA/0,6.....	107

Figura 41: Registro das curvas de 'Deformação <i>versus</i> Tempo' (esquerda) e ' <i>Net strain versus Elapsed time</i> ^{1/2} ' (direita) – Dosagem CRFPA/1,2.....	108
Figura 42: Registro das curvas de 'Deformação <i>versus</i> Tempo' (esquerda) e ' <i>Net strain versus Elapsed time</i> ^{1/2} ' (direita) – Dosagem CRFV-AR/0,6.....	109
Figura 43: Registro das curvas de 'Deformação <i>versus</i> Tempo' (esquerda) e ' <i>Net strain versus Elapsed time</i> ^{1/2} ' (direita) – Dosagem CRFV-AR/1,2.....	110
Figura 44: Condições do ambiente teste – Amostra CS.....	111
Figura 45: Condições do ambiente teste – Amostra CRFPA/0,6.....	111
Figura 46: Condições do ambiente teste – Amostra CRFPA/1,2.....	112
Figura 47: Condições do ambiente teste – Amostra CRFV-AR/0,6.....	112
Figura 48: Condições do ambiente teste – Amostra CRFV-AR/1,2.....	113

Sumário

1. INTRODUÇÃO	18
2. OBJETIVO	21
2.1. Objetivo principal.....	21
2.2. Objetivo específico.....	21
3. REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1. Pisos industriais	22
3.2. Processo de fissuração no concreto	24
3.2.1. Efeito das restrições.....	25
3.2.2. Deformações no estado plástico.....	27
3.2.3. Fluência.....	27
3.2.4. Retração.....	28
3.3. Métodos para avaliar a retração	34
3.4. Tecnologias para reduzir a fissuração por retração.....	41
3.4.1. Concreto reforçado com fibras.....	42
3.5. CRF no ensaio de retração restringida	47
4. METODOLOGIA	53
4.1. Caracterização dos insumos.....	55
4.2. Dosagem do concreto	58
4.2.1. Ensaios de caracterização do concreto	59
4.3. Ensaio de retração por secagem restringida	62
4.3.1. Extensometria	63
4.3.2. Ambiente teste	65
4.3.3. Moldagem dos anéis de concreto	67
4.3.4. Potencial de fissuração	68
4.3.5. Avaliação da fissuração	70
5. RESULTADOS OBTIDOS	73
5.1. Ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido.....	73
5.1.1. Análise das curvas Deformação <i>versus</i> Tempo	73
5.1.2. Análise da 'Deformação máxima' e 'Idade de fissuração'	77
5.1.3. Análise do potencial de fissuração	83
5.1.4. Análise do padrão de fissuração.....	84
6. CONCLUSÃO	92
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	94
7. REFERÊNCIAS	95

APÊNDICE A. ESTUDO DO AMBIENTE TESTE	102
APÊNDICE B. CURVAS COMPLEMENTARES DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM PELO MÉTODO DO ANEL RESTRINGIDO	105
APÊNDICE C. REGISTRO DO AMBIENTE TESTE	111

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material amplamente utilizado na construção civil em todo o mundo, em virtude de suas propriedades, durabilidade e baixo custo, quando comparado a outras tecnologias (GUZLENA; SAKALE, 2021). Ao longo de sua vida útil, as estruturas em concreto devem manter condições plenas de utilização sem que apresentem danos que comprometam, seja em parte ou totalmente, o uso para o qual foi projetada (ABNT NBR 6118, 2014).

Nenhum material é inerentemente durável. Decorrente das interações com o ambiente, a microestrutura, assim como as suas propriedades, alteram com o tempo. Assume-se que determinado material chegou ao fim de sua vida útil quando as suas propriedades, sob determinadas condições de uso, se deterioram de forma a que este seja considerada insegura ou inviável para reparos. (MEHTA; MONTEIRO, 2013, p. 174, tradução nossa).

O conceito de durabilidade estabelecido pela ABNT NBR 6118 (2014) é imposto como a capacidade de a estrutura resistir às condições ambientais [previstas na época de projeto], conservando a sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço ao longo de sua vida útil, contanto que sejam utilizadas conforme preconizado em projeto.

Desta forma, para assegurar que o elemento estrutural atenda aos propósitos pelo qual foi projetado, tornar-se essencial controlar as operações e propriedades do concreto nas idades iniciais (MEHTA; MONTEIRO, 2013). Apesar do termo “idades iniciais” abranger uma quantidade ínfima de tempo da vida útil de uma estrutura em concreto, diversas operações são realizadas neste período (mistura, transporte do concreto até o canteiro de obras, acomodação nas formas e posterior desforma, consolidação, acabamento, método de cura).

Caso negligenciadas, resultar-se-á em manifestações patológicas e na perda de funcionalidade (transporte de cargas, pessoas e resistência estrutural), provocando, conseqüentemente, um reparo difícil e custoso da estrutura avariada (MYNARČÍK, 2013; MAZZOLI; MONOSI; PLESCIA, 2015; PAES, 2020). Enfatiza-se, desta maneira, a importância de reconhecer o problema potencial antecipadamente, visto que a sua prevenção pode reduzir a necessidade de reparos futuros (DOBSON, 1995). Uma das manifestações patológicas mais preocupantes nos pisos industriais é o surgimento de fissuras.

Com ênfase nas idades iniciais, as fissuras são resultado da sobreposição das tensões causadas pelos efeitos térmicos e pela retração. Ambos resultam na variação do volume do concreto, sendo que quando restringida de se deformar livremente, desenvolver-se-á tensões internas que, caso ultrapassem a resistência à tração do concreto, resultará no desenvolvimento de fissuras (ACI 231R, 2010).

No âmbito da engenharia, o estudo da fissuração por retração nas idades iniciais vem recebendo grande enfoque, haja vista a redução da capacidade de carregamento da estrutura de concreto e a deterioração devido à entrada de água e infiltração de agentes nocivos nas camadas inferiores, ocasionando o bombeamento de finos e descalçamento da placa (BALBO, 2009).

Para Neville e Brooks (2013, p. 232), “as fissuras devem ser evitadas ou controladas e minimizadas, pois afetam a durabilidade e a integridade estrutural, além de serem também esteticamente indesejáveis”. Logo, com a finalidade de prover o desempenho adequado da estrutura desde as primeiras idades até o final da vida útil, enfatiza-se a indispensabilidade no estudo do risco de fissuração (SANTOS, 2019).

No caso de elementos com grande área superficial, e.g. pisos industriais e pavimentos, o risco de fissuração devido à restrição [interna ou externa] é acentuado (SEE, ATTIOGBE; MILTENBERGER, 2003). Nas idades iniciais, isso se torna particularmente importante, pois o concreto apresenta uma baixa resistência à tração (ACI 231R, 2010).

Para o controle da fissuração por retração, almeja-se condicionar uma dosagem com efeitos combinados de elevadas propriedades mecânicas iniciais, maior idade de fissuração e menor largura de fissura (SUKSAWANG; YOHANNES, 2020).

O mercado dispõe de soluções distintas e tecnologias viáveis, como cura interna, aditivos redutores (RR) e compensadores de retração (CR), aplicação de cimentos expansivos (ACI 231R, 2010) e adição de fibras (SHAH; WEISS, 2006; MAZZOLI; MONOSI; PLESCIA, 2015; EHRENBRING *et al.*, 2019; dos SANTOS MOTTA; SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2021), que será o foco desta pesquisa.

Neste caso, quando as fibras são adicionadas primordialmente para o controle da fissuração induzida pelas variações de umidade e temperatura – incluindo o fenômeno da retração, elas são tratadas como reforço secundário

(BENTUR; MINDNESS, 1990). Em particular, fibras de baixo módulo de elasticidade, em dosagens pequenas (0,3% do volume de concreto), são aplicadas para reduzir a fissuração por retração plástica (BENTUR; MINDNESS, 1990; FIGUEIREDO, 2011).

Com ênfase na retração por secagem, a literatura apresenta ensaios empregando corpos de prova prismáticos ou anelares, os quais buscam avaliar o comportamento do concreto quando restringido ou livre de se deformar. Entretanto, em razão da dificuldade de separar experimentalmente as tensões resultantes dos efeitos térmicos e da retração, ensaios com as ações combinadas são propostos com o intuito de determinar o potencial de fissuração de materiais cimentícios (ACI 231R, 2010).

Contudo, a eficácia das fibras no processo de fissuração pode apenas ser verificada em ensaios cuja deformação do concreto é restringida (BENTUR; MINDNESS, 1990).

À vista disso, ressalta-se a metodologia proposta pela ASTM C1581/C1581M (2018), cujo ensaio de retração pelo método do anel restringido avalia a idade de fissuração e a tensão de tração induzida em materiais cimentícios quando restringidos.

Neste ensaio, a fissuração no concreto ocorre em função da restrição [externa] da deformação gerada pela retração por secagem e autógena e o calor de hidratação do cimento (ACI,PRC 544.11, 2022). Apesar das complexidades envolvendo o fenômeno da fissuração na estrutura em serviço, o ensaio do anel permite determiná-la com uma razoável verossimilhança (SEE; ATTIOGBE; MILTENBERGER, 2004). Em contrapartida, Bentur e Mindness (1990) limitam a aplicação dos ensaios de retração para fins qualitativos e comparativos entre diferentes dosagens.

Como hipótese deste trabalho, especula-se a aplicação de microfibras em compósitos cimentícios como alternativa para retardar a formação de fissuras devido à retração por secagem e, após a sua formação, promover a contenção da propagação e abertura das fissuras. Almeja-se controlar a fissuração por retração com o intuito de melhorar o padrão das edificações, seu uso e do ambiente urbano que a cerca, diminuindo a necessidade de intercorrências durante sua vida útil e desta forma reduzindo a geração de resíduos e conseqüente impacto ambiental. A

validade desta hipótese será verificada mediante um programa experimental com base no ensaio de retração por secagem restringida.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo principal

O objetivo [precípua] desta dissertação está em avaliar o potencial de fissuração do concreto convencional e reforçado com microfibras quando submetidas à retração por secagem nas idades iniciais, buscando controlar o fenômeno de fissuração com a variação do teor e do tipo de microfibra adicionada ao concreto, com a perspectiva de aumento de durabilidade de elementos estruturais.

2.2. Objetivo específico

Os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Investigar a influência da adição de microfibras de poliamida e vidro álcali-resistente no fenômeno de retração por secagem do concreto;
- Avaliar o potencial e idade de fissuração dos concretos devido à retração por secagem restringida, segundo a normativa internacional ASTM C1581/C1581M (2018);
- Verificar a abertura de fissuras nos corpos de prova do ensaio de retração por secagem restringida, visando determinar a dosagem mais suscetível para sua contenção;

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Pisos industriais

A aplicação do CRF como solução estrutural é marcante no campo de pisos industriais. Conforme Faria e Santos (2020), pisos industriais em concreto reforçado com fibras são vantajosos frente às armaduras tradicionais devido à redução dos custos com mão-de-obra e tempo de execução da estrutura.

Em complemento, Cárnio (2017) aponta que as fibras proporcionam um reforço estrutural em toda a seção transversal do piso, contrapondo à solução utilizando telas soldadas, cujo reforço se limita ao seu posicionamento na seção transversal.

No âmbito nacional, a aplicação de pisos industriais teve um avanço acentuado por volta da década de 1980, no qual comumente aplicavam-se argamassas de alta resistência como acabamento superficial. O seu dimensionamento seguia o modelo proposto pela *Portland Cement Association* (PCA), considerando um pavimento simples. Por volta dos anos 90, com o advento das fibras de aço, desenvolveu-se novas tendências de dimensionamentos, cujo emprego de modelos plásticos dos materiais na ruptura era contabilizado (IBTS, 2015; RODRIGUES, 2019).

O desempenho de um piso industrial depende diretamente do projeto, das especificações e das técnicas construtivas empregadas, devendo seguir um planejamento integrado e detalhado quanto ao uso atual e futuro da estrutura. Ainda assim, visando uma maior longevidade à estrutura, a inspeção e manutenção são imprescindíveis (HULETT; CLARKE, 2003).

Em princípio, pisos industriais podem ser projetados em placas de concreto não reforçado, cujos esforços são resistidos exclusivamente pelo concreto (RODRIGUES, 2019), ou com reforço visando limitar ou prevenir a formação de fissuras devido à restrição da retração/temperatura e aos carregamentos impostos (ACI 360R-7, 2010).

O Quadro 1 apresenta uma breve descrição dos tipos de pavimento de concreto voltados à pisos industriais.

Quadro 1: Classificação dos pisos industriais

Categoria	Descrição
Sem reforço	
Concreto simples	Sistema de simples construção. Requer juntas serradas de contração menos espaçadas, aumentando o posterior custo de manutenção. Placas mais suscetíveis ao empenamento (ACI 360R-10, 2010).
Limitação da fissuração	
Concreto armado	O concreto trabalha no regime de compressão (BALBO, 2009). As armaduras são responsáveis pelo desempenho estrutural do piso (RODRIGUES, 2019).
Concreto com armadura contínua	A armadura contínua é posicionada pouco acima da linha neutra, cuja finalidade está em manter as faces fissuradas unidas (BALBO, 2009). Usualmente requer uma taxa de reforço elevada. Efeito de empenamento das placas reduzido (ACI 360R-10, 2010). Elimina-se a necessidade de juntas serradas de contração (BALBO, 2009; ACI 360R-10, 2010).
Concreto reforçado com tela simples	As telas podem ser aplicadas com o intuito de apenas controlar a fissuração ou com a função de reforço estrutural também (RODRIGUES, 2019).
Concreto reforçado com fibras de aço	A adição de fibras de aço resulta no aumento da resistência ao impacto e à fadiga. Entretanto, necessitar-se-á de ajustes no procedimento de mistura, moldagem e procedimentos de acabamento. Para ambientes com condições úmidas, as fibras expostas próximas à superfície ficam suscetíveis à corrosão (ACI 360R-10, 2010).
Concreto reforçado com fibras sintéticas	Assim como às fibras de aço, macrofibras sintéticas proporcionam aumento da resistência ao impacto e à fadiga. Como vantagem, as fibras sintéticas não são corroídas. Entretanto, as microfibras sintéticas não proporcionam controle de fissuração devido à retração por secagem. O dimensionamento de placas reforçadas com microfibras deve seguir os princípios daquelas em concreto simples. Por outro lado, visto que as macrofibras proporcionam a resistência residual pós-pico, o seu dimensionamento assemelha-se às placas reforçadas com fibras de aço (ACI 360R-10, 2010).
Prevenção da fissuração	
Concreto de retração compensada	Visando o controle da retração, o concreto é confeccionado seja com cimento expansivo ou aditivo compensador de retração (ACI 360R-10, 2010).
Concreto protendido	Estrito controle da fissuração devido à retração e à flexão (ACI 360R-10, 2010). Placas de grandes dimensões e menores espessuras (BALBO, 2009).

Fonte: Autoria própria.

Fibras de aço são comumente empregadas em pisos industriais em quantidade de 20 a 40 kg/m³, cuja função está em minimizar a aparição de fissuras visíveis e prover melhores propriedades mecânicas ao compósito, como resistência ao cisalhamento, à fadiga, ao impacto e o seu comportamento à flexão pós-fissuração (ACI 302-1R, 2015).

Dentre as fibras sintéticas, as fibras de náilon (poliamida) e polipropileno são as mais aplicadas no contexto de pisos e lajes. As micro- e macrofibras sintéticas são usualmente adicionadas em dosagens entre 0,45 a 1,80 kg/m³ e 1,8 a 12 kg/m³, respectivamente. As microfibras sintéticas possuem como propósito incrementar a capacidade de deformação à tração do concreto no estado plástico,

amenizando a formação de fissura na superfície devido aos efeitos da retração e assentamento plástico. Junto com o baixo impacto ao compósito quando endurecido, o emprego de outro reforço é indispensável. Por sua vez, as macrofibras sintéticas resultam na redução da fissuração decorrente da retração por secagem em compósitos que apresentam baixo nível de retração (ACI 302-1R, 2015).

3.2. Processo de fissuração no concreto

Dependendo da fissura, ressalta-se que a sua significância e aceitação dependem do tipo de estrutura, propósito de utilização e da natureza de origem da fissura. Em adição, as fissuras se originam de distintas causas, podendo afetar somente a aparência ou indicar problemas de maior magnitude, como falha estrutural ou perda de durabilidade (ACI 224.1R, 2007).

A formação de fissuras em pisos industriais é objeto frequente de queixa. O seu entendimento é substancial para que medidas preventivas possam ser consideradas com antecedência (ACI 302.1R, 2015).

A água normalmente está envolvida no processo de deterioração das estruturas (MEHTA; MONTEIRO, 2013). Logo, as fissuras resultam na redução da capacidade de carregamento do concreto e, conseqüentemente, na perda de durabilidade, visto que propiciam a entrada de água na estrutura, além de outros agentes nocivos (BALBO, 2009).

Por meio da prevenção ou mitigação da fissuração, sobretudo nas idades iniciais, aumentar-se-ia a durabilidade e vida útil das estruturas e, conseqüentemente, a sustentabilidade (ACI 231-1R, 2010).

Neste propósito, características do concreto nas idades iniciais têm sido foco de estudo (SAFFIUDIN *et al.*, 2018). O termo “idade inicial” proposto pelo comitê da *American Concrete Institute* (ACI 231-1R, 2010) define-a como o período seguido do fim de pega, onde as propriedades do concreto estão em célere mudança, até um período de aproximadamente 7 dias (considerando um concreto simples de cimento Portland submetido à cura úmida em temperatura ambiente). Adendo à definição atribuída, Combrinck, Steyl e Boshoff (2018) enfatizam a necessidade de distingui-la do estado fresco do concreto.

Em serviço, fatores como o grau de restrição, efeitos da hidratação, métodos de cura e construtivos e fatores ambientais contribuem para a formação

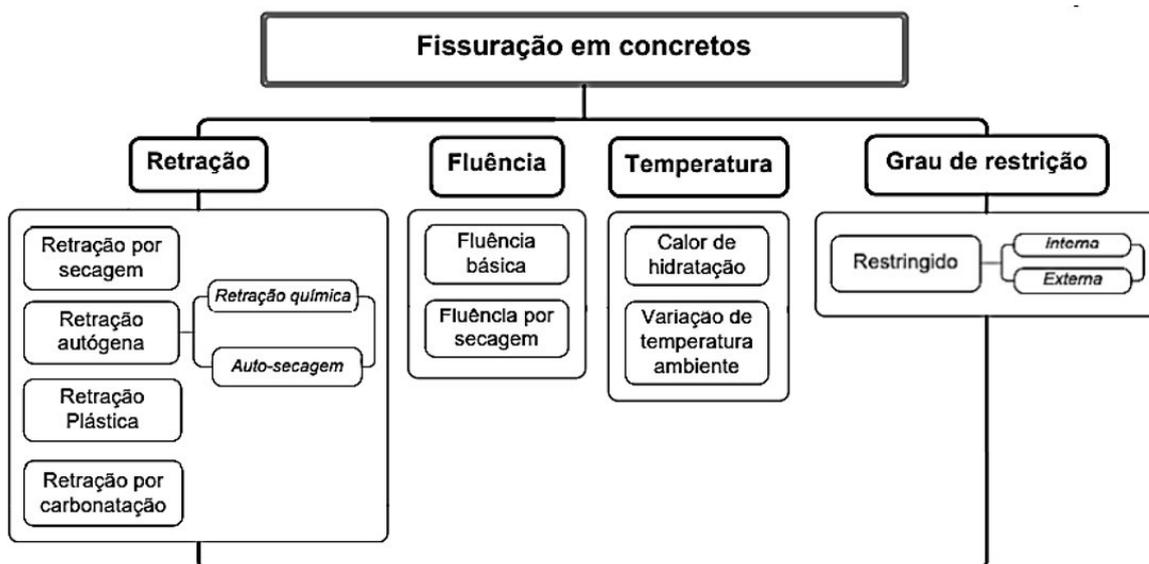
de fissuras (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS T 334, 2020).

As fissuras ocasionadas pela sobrecarga ocorrem seja pelo dimensionamento impróprio da estrutura, carregamento atuando em uma seção defeituosa ou cargas impostas precocemente.

Além da fissuração decorrente da aplicação de tensões, deve-se contemplar aquelas decorrentes da variação de volume no concreto devido as deformações térmicas e o fenômeno da retração (NEVILLE; BROOKS, 2013), em especial com ênfase nas idades iniciais (ACI 224.1R, 2007).

A Figura 1 esquematiza os principais fatores intervenientes ao processo de fissuração em concretos nas idades iniciais. A sua origem pode ocorrer tanto no seu estado fresco quanto endurecido do concreto.

Figura 1: Fissuração em elementos de concreto



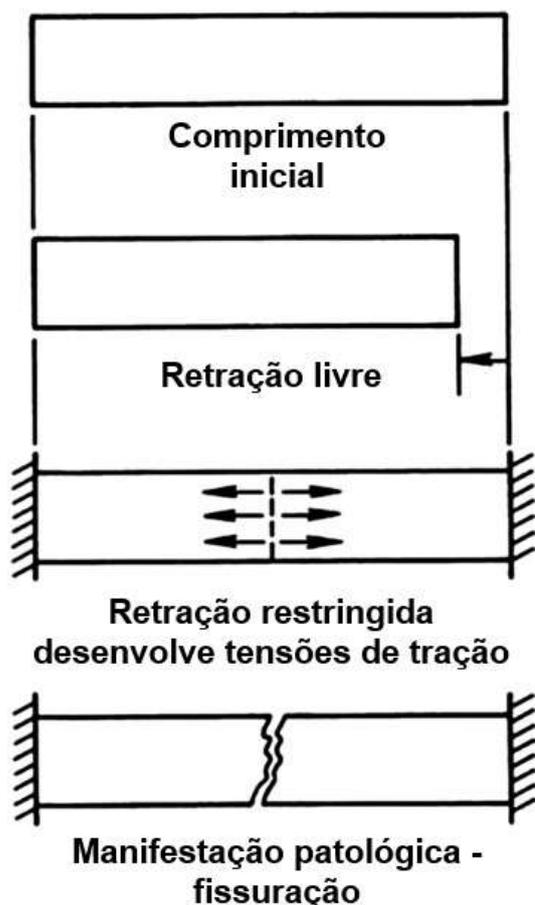
Fonte: Adaptado de Melo Neto *et al.* (2008).

3.2.1. Efeito das restrições

A livre variação de volume do concreto, ou seja, grau de restrição igual a zero, não incorreria em tensões que proporcionariam dano ao elemento, como fissuração (MELO NETO *et al.*, 2008). Segundo See, Attiogbe e Miltenberger (2003), a fissuração em decorrência da retração restringida é um problema em potencial para estruturas como pisos industriais, pavimentos em concreto e sobreposições.

Combinada às restrições, tensões de tração de maior magnitude são induzidas no compósito, resultando na fissuração quando a deformação imposta ultrapassa à capacidade de deformação em tração do material (BALBO, 2009), como esquematizado na Figura 2. Nas idades iniciais, isso se torna particularmente importante, visto a baixa resistência à tração do concreto (ACI 231R, 2010).

Figura 2: Esquematização da fissuração devido à restrição da retração



Fonte: Adaptado de ACI PRC-544.11 (2022).

As restrições podem ser divididas em interna ou externa. A restrição interna é decorrente da presença dos agregados, hidratação do cimento e presença de armaduras, enquanto a restrição externa está relacionada às condições de contorno, atrito com uma base ou confinamento entre outros elementos estruturais (MELO NETO *et al.*, 2008; SANTOS, 2019). Ademais, em pavimentos, a restrição também ocorre devido à camada de sub-base, o peso próprio da estrutura, elementos de transferência de carregamento e dentre outros (LIM; KIM; JEONG, 2014).

3.2.2. Deformações no estado plástico

No estado plástico, a fissuração ocorre em razão da retração e assentamento plástico (usualmente entre 1 e 8 horas após o lançamento), cujos fenômenos ocorrem concomitantemente em um curto período e compartilham fatores influenciadores similares (NEVILLE; BROOK, 2013; COMBRINCK; STEYL; BOSHOFF, 2018).

O concreto continua a consolidar após o processo de moldagem, vibração e acabamento. Assim, o assentamento plástico é denominado pela redução de volume oriundo do movimento em sentido descendente (gravitacional) das partículas sólidas no estágio fresco do concreto, deslocando concomitantemente a água para a sua superfície (exsudação) que será posteriormente removida – usualmente por evaporação (COMBRINCK; STEYL; BOSHOFF, 2018).

Caso haja alguma restrição na direção vertical (como por exemplo formas e armaduras), o assentamento plástico induz o desenvolvimento de tensões e resulta em pontos vazios e/ou fissuras (ACI 224.1R, 2007).

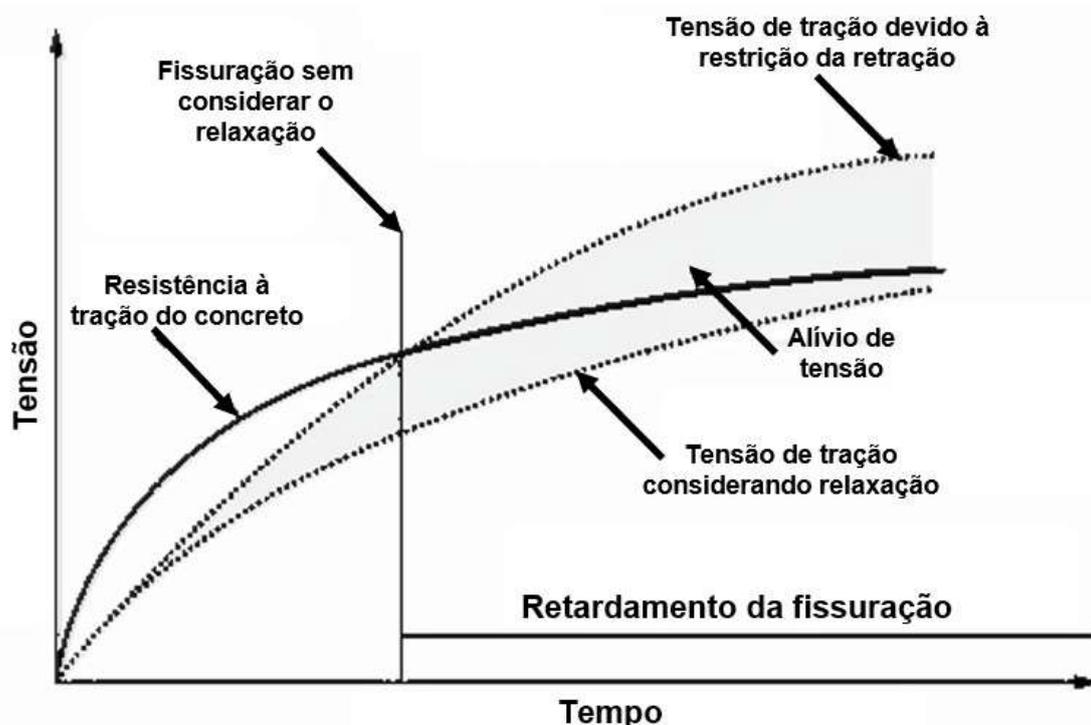
3.2.3. Fluência

Quando submetido à uma carga permanente, o concreto continua a deformar ao longo do tempo. Esse fenômeno é denominado fluência básica, sendo descoberto em 1907 por Hatt (1907, apud BAŽANT, 1975). Entretanto, o concreto também apresenta deformações que são intrínsecas às forças internas. A retração é um fenômeno inerente do concreto que ocasiona deformações volumétricas ao longo do tempo em razão da variação da quantidade de água interna e processos químicos de longa duração (BAŽANT, 1975).

Quando o concreto é exposto à um ambiente de baixa umidade relativa e submetido à uma carga, o somatório da deformação elástica com a retração livre por secagem e a fluência básica difere-se da deformação total. A fluência adicional é denominada fluência por secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2013). A restrição da retração induz um estado de tensão no elemento. A fluência possibilita que o concreto escoie pequenas deformações, resultando no efeito de relaxamento de tensões em função do comportamento viscoelástico do concreto.

Desta maneira, como evidenciado na Figura 3, a fluência promove um alívio de tensão na restrição da retração, retardando o processo de fissuração (MELO NETO *et al.*, 2008; BROOKS, 2015).

Figura 3: Influência no processo de fissuração devido a interação entre a fluência e retração



Fonte: Troxell, Davis e Kelly (1968) *apud* Mehta e Monteiro (2013)¹.

3.2.4. Retração

O fenômeno da retração, o qual independe da aplicação de carregamentos, resulta na deformação tridimensional do concreto. Visto que os elementos em concreto usualmente possuem uma ou duas dimensões muito superiores à terceira, o efeito da retração torna-se acentuado na direção de maior dimensão. Portanto, esse processo é usualmente expresso como uma deformação linear (AİTCIN; NEVILLE; ACKER, 1997), sendo expresso em unidades de mm por mm.

O termo retração é utilizado para se referir ao processo de secagem do concreto quando exposto ao ambiente (AİTCIN; NEVILLE; ACKER, 1997). Entretanto, ela ocorre em diferentes idades do concreto, iniciando-se no estado plástico e prosseguindo nas denominadas idade inicial e tardia (HOLT, 2005).

¹ TROXELL, G.E.; DAVIS, H.E.; KELLY, J.W. Composition and Properties of Concrete. New York: McGraw-Hill. 1968. 529 p.

Relativo ao período em que ocorre, a retração é subdividida em seis categorias: química, autógena, plástica, hidráulica (também referida como retração por secagem), térmica e por carbonatação.

Assim, a retração total do concreto pode ser expressa pelo somatório de todas as retrações individuais. Enfatiza-se ainda que não há correlação da magnitude da retração nos estágios, devendo-as considerar em conjunto como a retração total do compósito (HOLT, 2005). Em ordens de grandeza, a retração do concreto apresenta valores em torno de $200 - 800 \cdot 10^{-6}$ mm/mm.

Genericamente associadas, as retrações química e autógena compreendem as mudanças de volume não térmicas associadas às reações hidráulicas do material cimentício, enquanto a retração plástica e por secagem ocorrem em função da evaporação da água na superfície durante o estado fresco e endurecido do concreto, respectivamente (EPPERS, 2010).

O Quadro 2 busca indicar os principais fatores [intrínsecos e extrínsecos] que interferem nas componentes da retração, assim como a sua significância.

Quadro 2: Nível de influência de fatores nas componentes individuais da retração

Fatores	Efeito nas componentes da retração		
	Plástica	Hidráulica	Térmica
Retração			
Tipo de cimento Portland	n	n	L
Características dos agregados	n	L	L
Mistura	n	M	L
Dosagem	M	L	L
Moldagem e adensamento	M	n	n
Tratamento da superfície	n	n	M
Condições de cura (umidade relativa e temperatura)	L	L	L

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2013).

Notas: (L) *Large effect* – Efeito considerável; (M) *Moderate effect* – Efeito moderado; e (n) *Negligible effect* – Efeito negligenciável.

3.2.4.1. Retração plástica

A retração plástica ocorre anterior à retração autógena (AÏTCIN; NEVILLE; ACKER, 1997). A redução de volume do concreto, enquanto no estado fresco, é oriunda da retração plástica, cujo efeito torna-se mais acentuado para elementos com grande área exposta aos efeitos climáticos (BALBO, 2009; BOSHOFF; COMBRINCK, 2013).

A rápida secagem do concreto fresco causa retração plástica quando a taxa de perda de água superficial for superior à taxa de exsudação (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

A temperatura externa e radiação solar causam um gradiente térmico ao longo da profundidade, formando uma crosta rígida na superfície do concreto que posteriormente poderá apresentar fissuras superficiais, caso não resista às tensões de tração decorrentes da retração plástica (BALBO, 2009). Apesar dessas fissuras serem originalmente superficiais, elas serão posteriormente propagadas ao longo da vida útil da estrutura (ACI 224.1R, 2007).

A retração plástica é mais acentuada quanto maior for a velocidade de evaporação da água (NEVILLE; BROOKS, 2013). Logo, como indicado no Quadro 2, ambientes com baixa umidade relativa do ar, alta temperatura no concreto, incidência de alta velocidade de ventos e misturas ricas em cimentos intensificam a taxa de evaporação da água superficial (MEHTA; MONTEIRO, 2013; RODRIGUES, 2019).

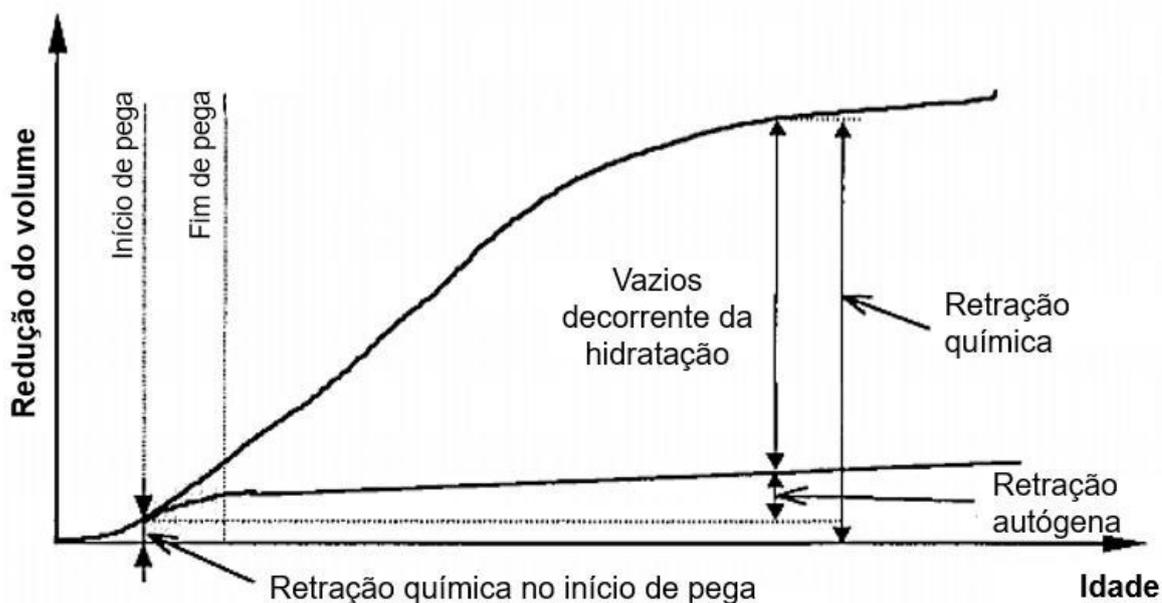
3.2.4.2. Retração química e autógena

A ASTM C1608-17 (ASTM, 2017) define a retração química como a redução relativa de volume interno associado à hidratação do cimento, visto que os produtos da hidratação ocupam menos volume físico que os reagentes.

No estado fresco, a retração autógena se equivale à retração química (HOLT, 2005). À medida que a pasta de cimento enrijece e desenvolve um esqueleto rígido (próximo ao início do tempo de pega), a retração química começa a se divergir da retração total do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2013) – verificar, na Figura 4, a redução equivalente à idade de início de pega. Na ausência de uma fonte externa de água, o progresso da hidratação resulta em vazios adicionais na microestrutura (TAZAWA, 1999). Como consequência, a retração autógena é substancialmente reduzida em relação à retração química devido à formação de poros (ACI 231R-10, 2010).

Por definição, a retração autógena é a redução macroscópica do volume desenvolvida por materiais cimentícios em função da hidratação do cimento após o início de pega. A retração autógena não compreende a mudança de volume em razão da perda de substâncias, variação de temperatura ou forças externas (TAZAWA, 1999).

Figura 4: Relação entre a retração química e autógena



Fonte: Adaptado de Tazawa (1999).

À medida que os processos de hidratação progridem, a água de gel e capilar são consumidas, formando meniscos. Conforme os poros perdem água, os meniscos capilares atenuam. A auto dessecação ocorre devido ao consumo da água capilar durante o processo de hidratação do cimento (TAZAWA, 1999). Com a ausência de uma fonte externa de água, a humidade relativa interna decresce (secagem interna), aumentando a curvatura dos meniscos e induzindo tensões capilares na estrutura dos poros (MOHR; HOOD, 2018), induzindo a contração da pasta de cimento endurecida (BROOKS, 2015).

No concreto simples, a deformação devido à retração autógena é desprezível. Esta componente ocorre expressivamente em concretos com baixa relação água/cimento ($a/c < 0,42$) ou com a adição de sílica ativa na mistura (MEHTA; MONTEIRO, 2013; ASTM C1698, 2019). Pisos industriais estão mais propícios a esse tipo de retração quando recebem apenas cura química (RODRIGUES, 2010). Como alternativa para evitá-la, recomenda-se manter a superfície do concreto constantemente molhada, para que os capilares absorvam a água (MAJ; UBYSZ, 2021).

3.2.4.3. Retração por secagem

Materiais cimentícios também retraem em função da perda de água ao ambiente. Isso ocorre na tentativa de o concreto alcançar um potencial hídrico equivalente ao ambiente externo, onde a umidade relativa é inferior àquela interna ao concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2013). Assim, define-se a retração por secagem

como a redução de volume até que não haja a liberação de água ao seu entorno (ACI 302.1R, 2015).

À medida que a água é evaporada dos poros, ocorre a formação de meniscos na interface líquido-vapor. Conforme o raio da curvatura dos meniscos diminui, aumenta-se a tensão superficial, impulsionando as paredes dos poros adentro. Neste processo, a estrutura do concreto responde às forças internas retraindo (AÏTCIN, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2013).

Nota-se que a retração por secagem e autógena compartilham do mesmo fenômeno físico desenvolvido no concreto – tensão superficial desenvolvida nos pequenos poros da pasta de cimento do concreto como resultado da atenuação dos meniscos (AÏTCIN, 1999). Entretanto, o autor aponta as seguintes diferenças:

- Diferentemente da retração por secagem, a retração autógena se desenvolve sem que haja a perda de massa;
- A retração autógena é um processo isotrópico que se desenvolve no interior do concreto, enquanto a retração por secagem tem início na superfície e posteriormente se propaga ao interior do elemento;
- A retração autógena não desenvolve um gradiente de umidade relativa, como no caso da retração por secagem.

Como indicado no Quadro 2, a magnitude da retração por secagem depende de distintos fatores, como: propriedades dos materiais, dosagem do concreto, condições do ambiente externo (temperatura e umidade relativa) e, também, as dimensões do elemento exposto ao processo de secagem. Abaixo, são discutidos [brevemente] os principais parâmetros que interferem na retração por secagem.

Influência do agregado:

Os agregados contribuem como restrição interna aos efeitos da retração ocasionados pela pasta de cimento. A quantidade e qualidade dos agregados são fundamentais para a redução da retração (BROOKS, 2015).

Assumindo uma relação água/cimento constante e determinado grau de hidratação, o aumento do teor volumétrico do agregado no concreto reduz os efeitos da retração (NEVILLE; BROOKS, 2013). Entretanto, os mesmos autores enfatizam que a dimensão máxima do agregado graúdo não influencia diretamente na redução da retração.

Por outro lado, o módulo de elasticidade se mostrou um fator considerável na retração. Agregados de elevado módulo de elasticidade tendem a manifestar uma retração por secagem inferior (ACI 209.1R, 2005; BALBO, 2009; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Em complemento, Tran *et al.* (2021) destacam que o volume e formato dos agregados influenciam indiretamente na porosidade da mistura e, conseqüentemente, na retração.

Portanto, a dosagem deve contabilizar a máxima quantidade praticável de agregados bem graduados e sem impurezas (ACI 360R, 2010).

Influência da relação água/cimento:

Com foco em pisos industriais, para atender aos requisitos estruturais e da retração por secagem, a dosagem deve ser elaborada de maneira que provenha trabalhabilidade e tempo de pega adequados para que satisfaçam às operações de tratamento superficial do piso (ACI 302.1R, 2015).

Considerando um mesmo consumo de cimento, o aumento na relação água/cimento eleva a retração por secagem (BALBO, 2009), visto que há uma redução no teor volumétrico do agregado no concreto (BROOKS, 2015).

A quantidade de água também influencia diretamente na exsudação da mistura e, conseqüentemente, no potencial de retração. Desta forma, dever-se-á elaborar o traço com a menor quantidade prática de água (ACI 302.1R, 2015).

Influências do ambiente externo:

O ambiente onde o concreto é moldado, lançado e curado interfere diretamente no desenvolvimento da retração por secagem, sendo intensificado em ambientes de baixa umidade relativa do ar, elevadas temperaturas, incidência de alta velocidade de ventos (ACI 209.1R, 2005).

Influências construtivas:

Do ponto de vista prático, o foco deve ser direcionado à fissuração devido à retração por secagem, cujo resultado é decorrente do desenvolvimento de tensões causado pela restrição da deformação. Essa manifestação patológica tem início na superfície do elemento de concreto exposta ao ar (AİTCIN; NEVILLE; ACKER, 1997), progredindo posteriormente ao interior da estrutura. Desta maneira, elementos com menor relação superfície / volume tendem a apresentar uma perda de água ao ambiente mais lenta (AİTCIN, 1999; BALBO 2009), influenciando

também na retração não-uniforme ao longo da seção transversal (ACI 209.1R, 2005).

3.2.4.4. Retração térmica

Segundo Santos (2019), os efeitos da temperatura no concreto proveem de origem externa (condições climáticas aliadas à temperatura, umidade e velocidade do vento) e interna (calor gerado pela hidratação do aglomerante).

Em estruturas robustas, o aumento de temperatura oriundo do processo de hidratação resulta na deformação térmica (TAZAWA, 1999). A retração térmica está associada ao calor produzido pela hidratação do cimento juntamente com a baixa dissipação de calor do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

O aumento significativo da temperatura proveniente das reações de hidratação resulta na expansão do concreto. Subsequentemente, o seu resfriamento à temperatura ambiente desencadeia a formação de fissuras. A sua ocorrência é acentuada para estruturas em concreto massivas e concretos com consumo elevado de ligantes hidráulicos (BALBO, 2009; SANTOS, 2019).

3.2.4.5. Retração por carbonatação

Por fim, a retração por carbonatação, potencialmente limitada para a área superficial do componente, refere-se à redução de volume devido à interação dos produtos hidratados com o dióxido de carbono (CO_2) absorvidos do ambiente (MELO NETO *et al.*, 2008; EPPERS, 2010).

Na presença de umidade, o CO_2 resulta em ácido carbônico, o qual reage com os cristais de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), formando carbonato de cálcio (CaCO_3). O processo de carbonatação parte da superfície do concreto para o seu interior, sendo um processo lento, cuja taxa real de carbonatação depende da permeabilidade do concreto, da umidade [interna] e da quantidade de CO_2 e umidade relativa no ambiente externo (BROOKS, 2015).

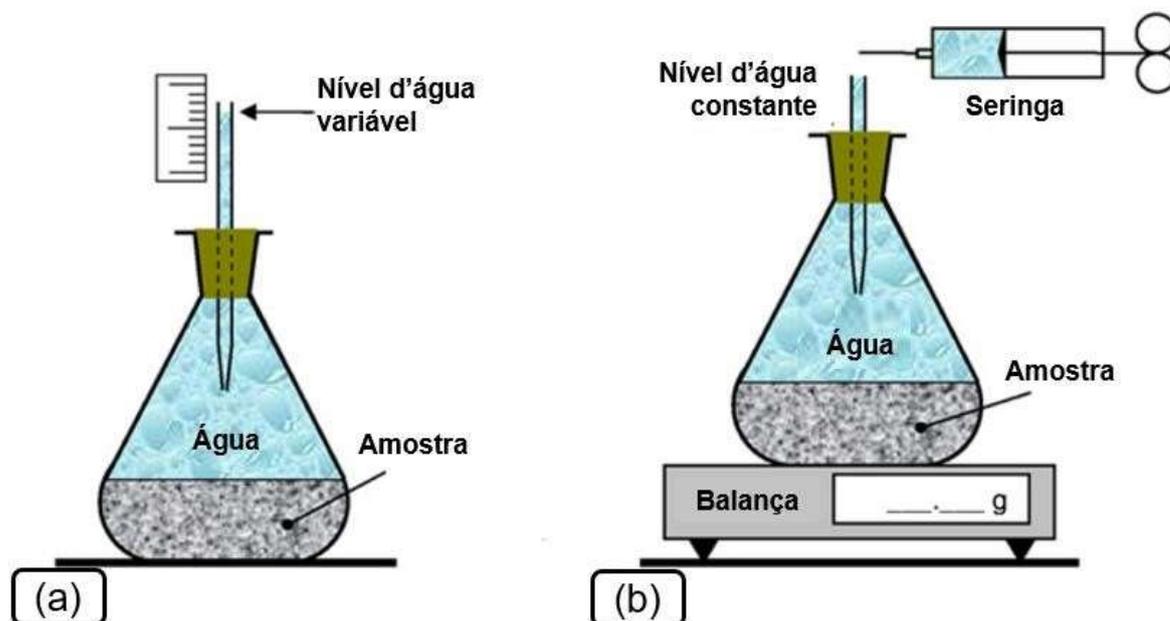
3.3. Métodos para avaliar a retração

A literatura expõe metodologias que visam avaliar a suscetibilidade à retração do concreto, inclusive com destaque em cada componente da retração. Todavia, mensurar a retração logo nas idades iniciais se torna desafiador em virtude da imprecisão gerada por distúrbios na coleta de dados, visto o seu início consecutivo à moldagem (HOLT, 2005).

As metodologias propostas para avaliar a retração química se diferenciam daquelas voltadas à retração autógena devido à fonte externa de água disponível para a pasta de cimento absorver. Em contrapartida, a pasta de cimento, ou argamassa, é selada nos ensaios de retração autógena de maneira que se evite a transferência de umidade pelo ambiente (HOLT, 2005).

Conforme a ASTM C1608-17 (ASTM, 2017), a retração química da pasta de cimento hidráulico pode ser mensurada por dois procedimentos. Ambos os ensaios consistem em adicionar uma pasta de cimento (relação $a/c = 0,40$) com espessura entre 5 e 10 mm no fundo do frasco de vidro, o qual será sequencialmente preenchido com água destilada. Então, adiciona-se uma rolha de borracha com um furo central, permitindo o encaixe do tubo capilar graduado. No Procedimento A (ver Figura 5a), a retração química é aferida pela redução do volume de água, enquanto no Procedimento B (ver Figura 5b) pelo acréscimo de massa no sistema, visto que conforme a pasta de cimento retrai, o nível d'água será posteriormente complementado com adição de água.

Figura 5: Ensaios de retração química em materiais cimentícios, sendo: (a) Procedimento A; e (b) Procedimento B



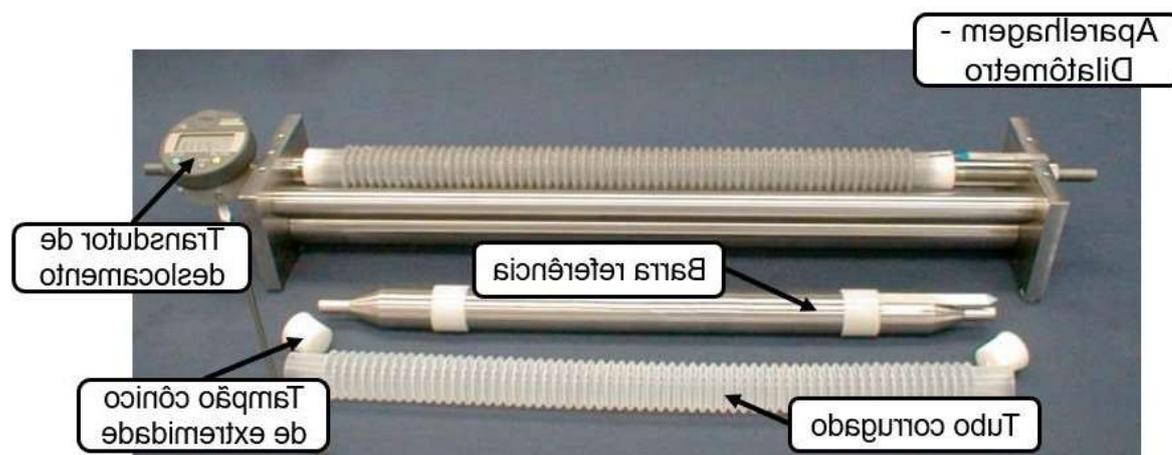
Fonte: Adaptado de Zhang *et al.* (2013).

A retração autógena é aferida por meio da deformação volumétrica, submergindo em água o concreto no estado fresco em uma membrana de borracha, ou linear, em moldes rígidos com baixa fricção (JENSEN; HENSEN, 1995). Segundo os mesmos autores, o método volumétrico possibilita iniciar as medições

imediatamente após a moldagem, porém erros de leitura podem ser decorrentes da falta de contato contínuo entre o balão/pasta de cimento ou devido à presença de ar aprisionado e uma película de água formada na superfície da pasta (fenômeno denominado exsudação). No método linear, apesar de possuir firme ancoragem nos pontos de medição, a pasta de cimento é restringida pelo molde.

A deformação devido à retração autógena de pastas de cimento ou argamassas aferida pelo método do tubo corrugado, atualmente preconizado pela ASTM C1698-19 (ASTM, 2019), combina as vantagens individuais dos métodos supracitados, enquanto evita parte das suas desvantagens. O tubo corrugado de plástico oferece mínima resistência às variações de comprimento (restrição) e previne a perda de umidade para o ambiente (laterais fechadas com tampões cônicos de extremidade). A variação dimensional do corpo de prova é mensurada com auxílio de um dilatômetro (ver componentes na Figura 6) posterior a sua calibração por meio da barra de referência. Jensen e Hansen (1995) constataram que a inexatidão das leituras antes do fim de pega ocorre devido ao fato dos pontos de suporte não estarem devidamente ancorados à pasta de cimento.

Figura 6: Aparato para medição da deformação devido à retração autógena (dilatômetro)



Fonte: Adaptado de ASTM C1698 (2019).

As metodologias referidas anteriormente preconizam métodos de ensaios para pastas de cimento ou argamassas. Sequencialmente, serão apresentados ensaios que também possibilitam a aplicação em concretos.

O Quadro 3 sintetiza metodologias que visam avaliar o desempenho à retração de compósitos cimentícios por meio de uma abordagem relativa à eficácia dos ensaios no estudo do desempenho do concreto reforçado com fibras.

O ensaio de retração livre é adequado para avaliar o potencial de retração em distintas misturas. Devido à ausência de restrição, o compósito não manifesta fissuração, tornando-o ineficiente para avaliar a eficácia da adição de fibras, em especial macrofibras. Entretanto, determinadas microfibras sintéticas podem atenuar os efeitos da retração, visto que reduzem a exsudação, evaporação e mitigam a retração plástica do concreto (ACI-PRC 544.11, 2022).

Quadro 3: Aplicação de ensaios de retração em concretos reforçados com fibras

ABNT NBR 16834 (2020a)	
<i>Descrição</i>	Retração livre de corpos de prova prismáticos.
<i>Aplicação</i>	Metodologia não eficiente para estudo de macrofibras, visto que o ensaio não implica na fissuração do compósito (BENTUR; MINDNESS, 1990; ACI PRC-544.11, 2022).
ASTM 1579 (2021)	
<i>Descrição</i>	Retração plástica de painéis retangulares <u>restringidos</u> por entalhe (<i>stress risers</i>).
<i>Aplicação</i>	Metodologia eficiente para avaliar a suscetibilidade à fissuração do CRF, quando comparado a uma amostra referência.
ASTM C1581/1581M (2018) e AASHTO T 334-08 (2020)	
<i>Descrição</i>	Retração por secagem <u>restringida</u> de corpos de prova moldados ao redor de um anel de aço.
<i>Aplicação</i>	Metodologia eficaz para comparar o tempo de fissuração e a sua redução entre amostras referências e em CRF. Ensaio de longa duração, quando comparado ao ensaio proposto pela ASTM 1579 (2021).

Fonte: Baseado em ACI PRC-544.11 (2022).

Visando determinar o efeito da adição de fibras à matriz cimentícia, ressalta-se o ensaio do anel e de painéis em concreto, os quais apresentam restrições externas e condições específicas de ambiente.

No âmbito nacional, a ABNT NBR 16834 (2020a) prescreve uma metodologia para determinação da variação dimensional livre do concreto na ausência de restrição à retração ou expansão linear. Este método de ensaio é particularmente útil para a avaliação comparativa deste potencial em diferentes misturas de concreto na sua fase hidráulica e de endurecimento, com exclusão da aplicação de forças externas e mudanças de temperatura.

O ensaio consiste em moldar corpos de prova prismáticos com dimensões de (75 x 75 x 285) mm, cuja dimensão básica é superior [no mínimo] a três vezes a dimensão nominal máxima do agregado graúdo do concreto. Pinos de medidas são inseridos durante a fase de moldagem de maneira ortogonal e centralizados nas faces extremas da seção transversal dos corpos de prova.

Os pinos de medida penetram o corpo de prova $17,5 \pm 0,5$ mm, resultando em um comprimento efetivo (C_e) de $250 \pm 2,5$ mm – comprimento entre

as extremidades internas dos pinos de medida. O comprimento em suspensão dos pinos de medida (7,5 mm) permite o seu posterior encaixe no aparelho comparador (ver Figura 7).

Os terminais do pórtico (aparelho comparador) possuem uma superfície arredondada e polida, permitindo adaptar perfeitamente à forma dos pinos de medida dos corpos de prova.

Figura 7: Pórtico para ensaio de variação dimensional



Fonte: Autoria própria.

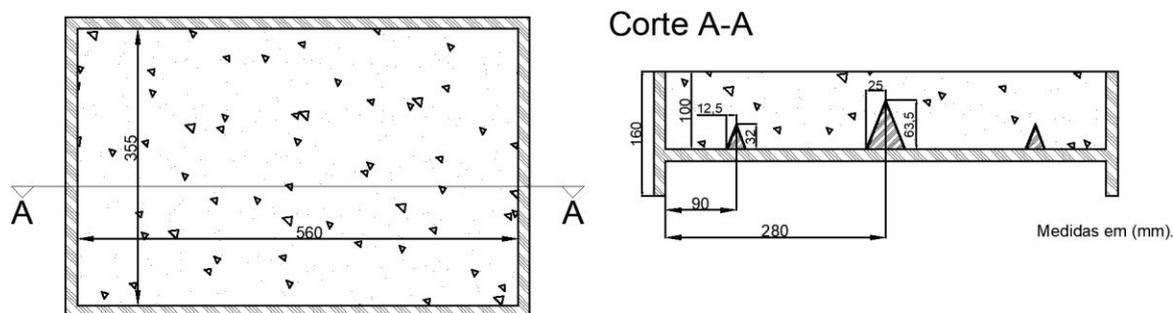
Nota: A variação dimensional dos corpos de prova, ao longo do tempo, é aferida, com relação a uma barra referênci, em aço, de $300 \pm 1,5$ mm, com auxílio de um aparelho comparador, o qual dispõem de um relógio comparador digital com resolução de 0,001 mm.

A medida inicial (l_0) é efetuada imediatamente após o processo de desmoldagem. Sequencialmente, os corpos de prova são armazenados em câmara úmida por um período de 7 dias em condições de temperatura e umidade relativa de $23 \pm 2^\circ \text{C}$ e $\text{RH} > 95\%$, respectivamente. Após o período de cura úmida, os corpos de prova devem ser armazenados em uma câmara seca – ambiente controlado ($23 \pm 2^\circ \text{C}$ e $\text{RH} > 50\%$), permanecendo até a idade de 56 dias para a coleta de dados.

A ASTM C1579-21 (ASTM, 2021) possibilita comparar a fissuração superficial por retração plástica em painéis de concreto reforçado com fibras e concreto simples. As dimensões do corpo de prova são esquematizadas na Figura 8. O chanfro central no molde de aço, denominado como *stress riser*, possui a função de localizar a primeira fissura, enquanto aqueles localizados nas laterais são restrições internas ao compósito.

Após a moldagem, os corpos de prova são expostos a condições de secagem controladas (taxa de evaporação, temperatura e umidade relativa de, respectivamente, $1,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$, $36 \pm 3^\circ\text{C}$ e $30 \pm 10\%$) suficientemente severas para induzir a fissuração por retração plástica no concreto simples.

Figura 8: Molde para ensaio de retração plástica



Fonte: Baseado em ASTM C1579-21 (2021).

O ensaio do anel consiste em moldar um anel de concreto ao redor de um anel de aço. Nestas condições, o anel de aço restringe a deformação do concreto, resultando no desenvolvimento de tensões internas de tração (ACI 231R-10, 2010). À vista disso, a metodologia do ensaio do anel restringido difundiu-se amplamente como ensaio de qualidade para determinar o potencial de fissuração de compósitos cimentícios (HOSSAIN; WEISS, 2006).

Datado próximo de 1930, o ensaio do anel permitia, inicialmente, visualizar somente o tempo para fissuração do concreto. O advento dos *strain gages* possibilitou estudos mais aprofundados, contribuindo para a avaliação do relaxamento de tensão e fissuração (LIM; KIM; JEONG, 2014).

Atualmente, este ensaio é regido pelas entidades de normalização AASHTO e ASTM, cujas principais características são denotadas na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações do ensaio do anel entre as normativas citadas

Especificações	Ensaio de retração pelo método do anel restringido	
	AASHTO T 334-08 (2020)	ASTM C1581/C1581M-18a (2018)
Dimensões do anel de aço interno		
Diâmetro externo [mm]	305,0 ± 5	330,0 ± 3
Espessura [mm]	12,7 ± 0,4	13,0 ± 1
Altura [mm]	152 ± 5	150 ± 6
Dimensões do anel de concreto		
Diâmetro externo [mm]	457,0 ± 5	405,0 ± 3
Espessura [mm]	76,0 ± 5	38,0 ± 1,5
Ambiente teste¹		
Umidade relativa [%]	50 ± 4	50 ± 4
Temperatura [°C]	21,0 ± 1,7	23,0 ± 2,0
Materiais		
Agregados - $\phi_{máximo}$ [mm]	Não especificado	13 mm
Moldagem		
Corpos de prova (mínimo)	2	3
Número de camadas	3	2
Golpes por camada	75 (haste de ϕ 16 mm)	75 (haste de ϕ 10 mm)
Vibração mecânica	Não recomendado	Sim

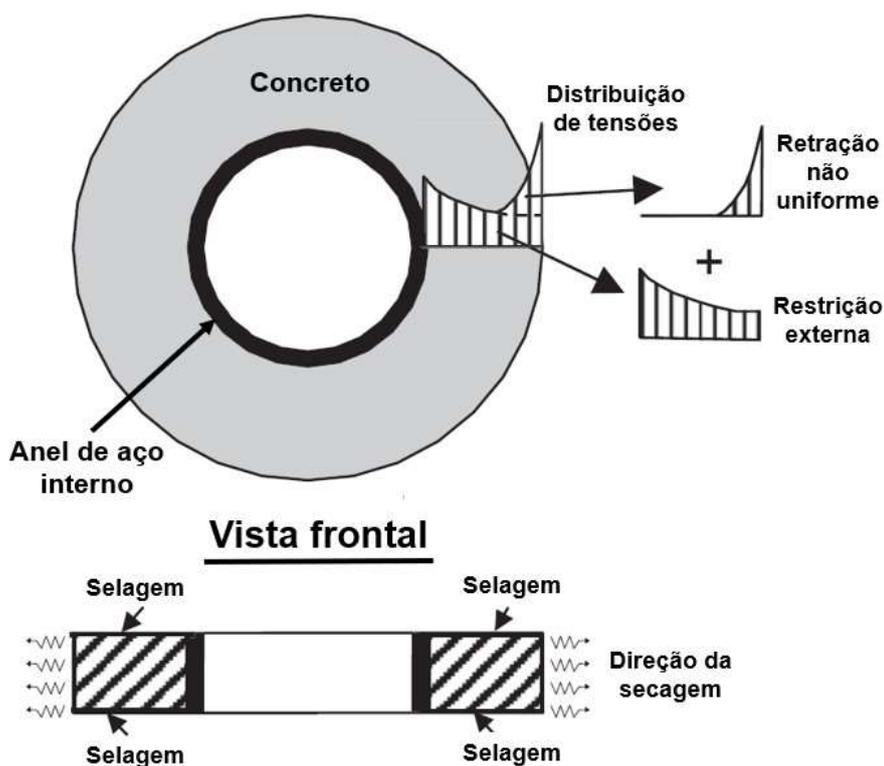
Fonte: Autoria própria.

Notas:

(1) Ambiente controlado cujas especificações descritas sejam mantidas constante.

Ambas as normativas propõem uma metodologia cujo processo de secagem ocorre pela circunferência externa do anel de concreto, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Ilustração das tensões de tração desenvolvidas ao longo da seção transversal no ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido



Fonte: Adaptado de Hossain e Weiss (2006).

Com o início do processo de secagem, o concreto é exposto ao ar de baixa umidade relativa, se comparado ao seu interior. Conforme o processo de secagem progride da superfície do anel de concreto externo adentro, desenvolve-se uma retração não-uniforme ao longo da seção transversal devido ao gradiente de umidade (KWON *et al.*, 2007; ACI PRC-544.11, 2022). Em função do diferencial de secagem entre as faces do anel de concreto, tensões de tração são induzidas próxima à superfície exposta à secagem, enquanto a superfície interna é induzida a pequenas tensões de compressão (BISSCHOP, 2003).

Inicialmente, o processo de fissuração é governado pela restrição interna (retração não-uniforme) até que a face interior do anel de concreto [em contato com o anel de aço interno] começa a retrair. A partir deste ponto, a restrição externa do anel interno de aço contribui para a formação de tensões de tração na seção transversal (BISSCHOP, 2003; KWON *et al.*, 2007).

Para amostras de anéis mais espessos, como no caso da AASHTO, tempo maior transcorre para que as tensões decorrentes da restrição externa se tornem efetivas. A razão para esse atraso é o tempo mais longo que leva para o interior do concreto começar a retrair (BISSCHOP, 2003).

Assim, a idade de fissuração no ensaio proposto pela ASTM C1581/C1581-18a (2018) antepõem-se àquele normatizado pela AASHTO T 334-08 (2020) devido ao maior grau de restrição (SEE; ATTIOGBE; MILTENBERGER, 2003).

3.4. Tecnologias para reduzir a fissuração por retração

A fissuração por retração, nas idades iniciais, é um problema em potencial para determinados projetos. O Quadro 4 descreve brevemente as principais tecnologias voltadas ao controle da fissuração por retração, como cura interna, aditivos compensadores (CR) e redutores de retração (RR), concreto com cimento compensador de retração e fibras.

Quadro 4: Tecnologias para mitigar a fissuração por retração

Descrição da tecnologia
Concreto com cimento compensador de retração
Concreto produzido com um cimento expansivo expande antecipadamente na mesma magnitude da retração por secagem. A expansão induz tensões de compressão no concreto, as quais serão posteriormente aliviadas pela retração. Idealmente, restará resíduos de compressão, eliminando o risco de fissuração por retração restringida (MEHTA; MONTEIRO, 2013).
Cura interna
A cura interna consiste em adicionar ao concreto um material rico em umidade, cuja função será compensar a água consumida pela hidratação do cimento (ACI 231R, 2010), atuando como um reservatório interno. Nestas condições, pode-se amenizar e/ou retardar a auto dessecação do concreto. Considera-se, como aplicação de cura interna, materiais capazes de absorver água e sequencialmente liberá-la ao sistema (MOHR; HOOD, 2018). Usualmente emprega-se agregados leves (<i>lighweight aggregates</i>), polímeros superabsorventes (SAPs) ou produtos à base de celulose (ACI 231R, 2010).
Aditivos Compensadores de Retração (CR)
Conforme a ABNT NBR 11768-1 (2019), o aditivo CR produzirá etringita ou hidróxido de cálcio ao reagir com o cimento e água, induzindo o aumento de volume (expansão) do concreto e compensando as forças de retração total. No Brasil, segundo Rodrigues (2019), encontram-se aditivos CR à base de óxido de cálcio supercalcinado ou sulfoaluminatos.
Aditivos Redutores de Retração (RR)
Aditivo cuja função principal é reduzir a retração autógena, atuando na diminuição da tensão superficial da água presente nos poros do concreto (ABNT NBR 11768-1, 2019; ACI 360R, 2010). Esses aditivos são integrados à dosagem, deve-se dissolvê-los na água de amassamento previamente ao seu contato com partículas sólidas (MEHTA; MONTEIRO, 2013).
Fibras
As fibras são adicionadas ao concreto com o intuito de melhorar o controle da fissuração e modificar o comportamento da matriz após a fissuração (dos SANTOS MOTTA; SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2021), permitindo a transferência dos esforços da matriz através da fibra. Fatores como características das fibras, dimensões, dosagem e orientação influenciam diretamente na eficiência de mitigar a retração por secagem (TRAN <i>et al.</i> , 2021). Uma descrição mais detalhada sobre a tecnologia do concreto reforçado com fibras encontra-se na seção 3.4.1.

Fonte: Autoria Própria.

3.4.1. Concreto reforçado com fibras

A matriz de concreto sem adição de fibras apresenta comportamento frágil quando comparada à matriz de CRF, tendo baixa capacidade de resistência das seções e baixas deformações quando submetidas a esforços de tração, e praticamente não apresentando deformações plásticas. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 16935, 2021a).

Em face do exposto, visando condicionar um melhor desempenho ao concreto e compensar o seu comportamento frágil, a aplicação de concreto reforçado com fibras (CRF) mostra-se uma alternativa promissora (SINGH, 2017).

Por definição, o CRF é um compósito caracterizado por uma matriz cimentícia com adição aleatória de fibras descontínuas.

A aplicação do CRF com o intuito de aumentar significativamente a resistência mecânica do material requer a incorporação de altos teores de fibras, prejudicando conseqüentemente a fluidez (CÁRNIO, 2017). Quando utilizada em

baixos teores, apesar das fibras alterarem as propriedades mecânicas da matriz cimentícia, não há um incremento significativo nas propriedades elásticas e na resistência à compressão e à tração do CRF. Desta forma, a fissuração acontecerá em um nível de tensão e deformação quase similar ao concreto referência. O ganho mecânico ocorre após a ruptura da matriz (IBRACON/ABECE, 2016).

Sob um ponto de vista amplo, o CRF pode ser aplicado para fins estruturais, com atuação isolada ou em conjunto com as armaduras [ativa ou passiva], favorecendo o comportamento no Estado Limite Último (ELU) e no Estado Limite de Serviço (ELS) (ABNT NBR 16935, 2021a).

Quando não associadas à aplicação estrutural, as fibras contribuem para o controle da fissuração nas idades iniciais e para a manutenção da capacidade resistente das seções em situação de incêndio, melhorando o comportamento no ELS, o desempenho em serviço e a durabilidade (IBRACON/ABECE, 2016).

3.4.1.1. Disposição do mercado

Atualmente, o mercado dispõe de uma ampla variedade de fibras, sendo que aquelas usualmente aplicadas no concreto provêm de origem natural (celulose, curauá, sisal, rami etc.) ou artificial – classificadas em inorgânicas (metálicas e minerais) ou sintéticas derivada de polímeros orgânicos (e.g., polipropileno, acetato de polivinila, acrílico, aramida, carbono, náilon, poliéster e dentre outros).

Tabela 2: Faixa de propriedades (genéricas) das fibras

Fibra	Diâmetro [µm]	Massa específica [kg/m³]	Módulo de elasticidade [GPa]	Resistência à tração [GPa]	Alongamento na ruptura [%]
Fibras naturais					
Sisal	10-50	1,5	-	0,8	3,0
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Fibras inorgânicas					
Aço	5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Carbono	8-9	1,6-1,7	230-380	2,5-4,0	0,5-1,5
Asbesto	0,02-0,4	2,6-3,4	164-196	3,1-3,5	2,0-3,0
Fibras poliméricas					
Polipropileno	20-400	0,9-0,95	3,5-10	0,45-0,76	15-25
Aramida (kevlar)	10-12	1,44	63-120	2,3-3,5	2-4,5
Náilon	23-400	1,14	4,1-5,2	0,75-1,0	16,0-20,0
Polietileno	25-1000	0,92-0,96	5,0	0,08-0,60	3-100
Acrílica	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3

Fonte: Adaptado de Bentur e Mindness (1990).

Segundo Carnio (2017), as fibras diferem entre si pelo seu material, geometria, processo de fabricação, composição química e física, características mecânicas e resistência a meios agressivos. A Tabela 2 indica faixas características das propriedades físicas, mecânicas e geométricas para determinadas fibras disponíveis no mercado.

Portanto, enfatiza-se a indispensabilidade em conhecer as características que constituem as fibras (RODRIGUES, 2019). Figueiredo (2011) aponta que as propriedades mais relevantes para análise das fibras são o módulo de elasticidade e a resistência mecânica, visto que interferem na capacidade de reforço que elas podem proporcionar ao concreto.

As fibras de alto módulo de elasticidade são adicionadas com o intuito de incrementar a resistência à propagação de fissuras, a impactos, à abrasão e sua capacidade de absorção de energia (GOMES, 2005).

Figueiredo (2011) atrela a eficácia do reforço das fibras de baixa resistência e módulo de elasticidade no estado fresco e no início do processo de endurecimento do concreto, visto às propriedades mecânicas do concreto ainda em desenvolvimento.

3.4.1.2. Mecanismo de transferência dos esforços

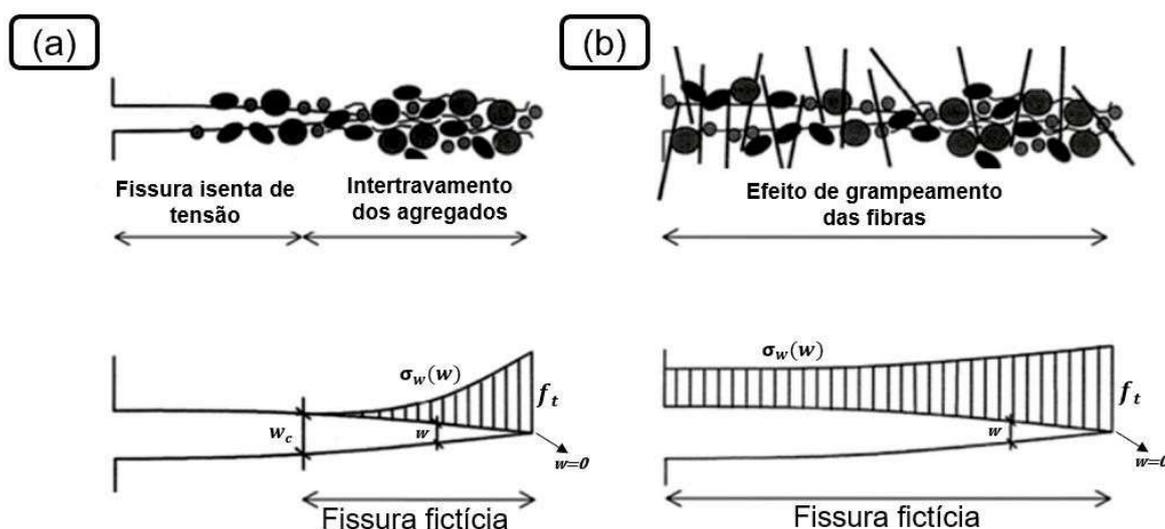
O ganho de desempenho provido pela distribuição aleatória das fibras acontece em razão da interação fibra-matriz, resultando na transferência dos esforços da matriz ao reforço (BENTUR; MINDNESS, 1990; EHRENBRING; TUTIKIAN; QUININO, 2018). O efeito de grampeamento proporcionado pelas fibras retarda a velocidade de propagação e amplificação das fissuras (LAWLER *et al.*, 2003). Portanto, segundo Bentur e Mindness (1990), o papel intrínseco desempenhado pelas fibras no CRF ocorre no patamar pós-fissuração, provendo ao concreto capacidade de carregamento.

A Figura 10 esquematiza o modo de fratura no concreto simples e reforçado com fibra. A fissura fictícia tem início no ponto de abertura da fissura nula ($w = 0$) e estende-se até a abertura crítica (w_c). Os efeitos de micro ligações, que deveriam existir, são representadas por tensões coesivas ($\sigma_w(w)$) atuantes nas faces, descritas em função da abertura da fissura (GEA DOS SANTOS, 2014).

No topo da fissura, assume-se uma tensão de tração equivalente à resistência à tração do concreto. No caso do concreto simples, a tensão decresce para zero no ponto de abertura crítica, pois as tensões deixam de ser transmitidas

devido à inexistência de intertravamento dos agregados (Figura 10a). Em contrapartida, a adição de fibras proporciona o efeito de grampeamento, como ilustrado na Figura 10b, ancorando ambas as faces da fissura e resistindo a uma abertura superior (DØSSLAND, 2008).

Figura 10: Modo de fratura e ilustração da fissura fictícia no (a) concreto simples; e (b) concreto reforçado com fibras



Fonte: Adaptado de Ayoubi, Mahrenholtz e Nell (2020).

Em concordância com Saradar *et al.* (2018), as macrofibras e microfibras resultam na transmissão de tensões sobre macro- e microfissuras, respectivamente.

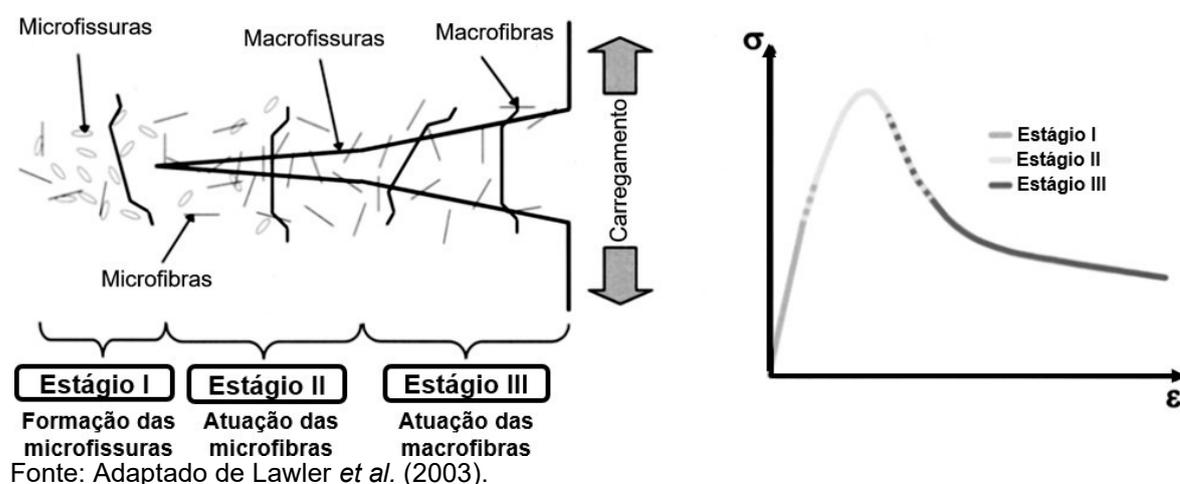
As microfibras mostram-se mais efetivas no controle inicial do alargamento das fissuras, porém não resistem ao aumento de sua extensão. A ocorrência da primeira macrofissura determina a máxima capacidade de carga do espécime. As microfibras perdem funcionalidade, porém continuam a resistir no patamar pós-pico (LAWLER *et al.*, 2003). As macrofibras tornam-se mais eficazes devido às suas dimensões e proporcionam maior ductilidade ao compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

Considerando uma mesma fração de volume do mesmo tipo de fibra, as microfibras apresentam, em comparação com as macrofibras, uma maior dispersão e quantidade de fibras ao longo do volume do elemento. Em virtude da maior área de superfície apresentada pelas microfibras que cruzam determinado plano de fratura, o seu emprego propicia conter mais eficazmente a propagação de microfissuras comparada às macrofibras (MEHTA; MONTEIRO, 2013).

Alternativamente, haja vista a diferença de propriedades e geometrias apresentadas pelas fibras, as micro- e macrofibras podem ser aplicadas em conjunto com o intuito de otimizar a performance da matriz. Neste caso, enfatiza-se a indispensabilidade de sinergia na hibridização de fibras. Com relação à hibridização com base nas dimensões das fibras, àquela de menor dimensão (reforço secundário) busca, nos estágios iniciais, conter a formação de microfissuras e postergar a sua coalescência. A macrofibra, por sua vez, provê a transferência dos esforços através das macrofibras tenacidade para altas deformações e abertura de fissuras (BENTUR; MINDNESS, 1990).

Em complemento, Lawler *et al.* (2003) descrevem o processo de fratura em três estágios, cujo comportamento do material é preponderantemente governado, em ordem, pela matriz, microfibras e macrofibras. Os estágios são esquematizados na Figura 11.

Figura 11: Desenho e diagrama esquemático da interação das micro- e macrofibras no desenvolvimento de fissuras



Conforme Lawler *et al.* (2003), o estágio I compreende a formação de microfissuras em pontos vulneráveis na matriz cimentícia. Com o aumento da deformação do material, as microfissuras são interligadas, tornando-se mais estreitas. Neste ponto, a presença de microfibras atenua à amplificação das fissuras (estágio II). O desenvolvimento da primeira macrofissura marca a capacidade máxima de carregamento do compósito (estágio III), resultando na perda de funcionalidade das microfibras. Neste ponto, o desempenho das macrofibras será eficiente em função de suas dimensões.

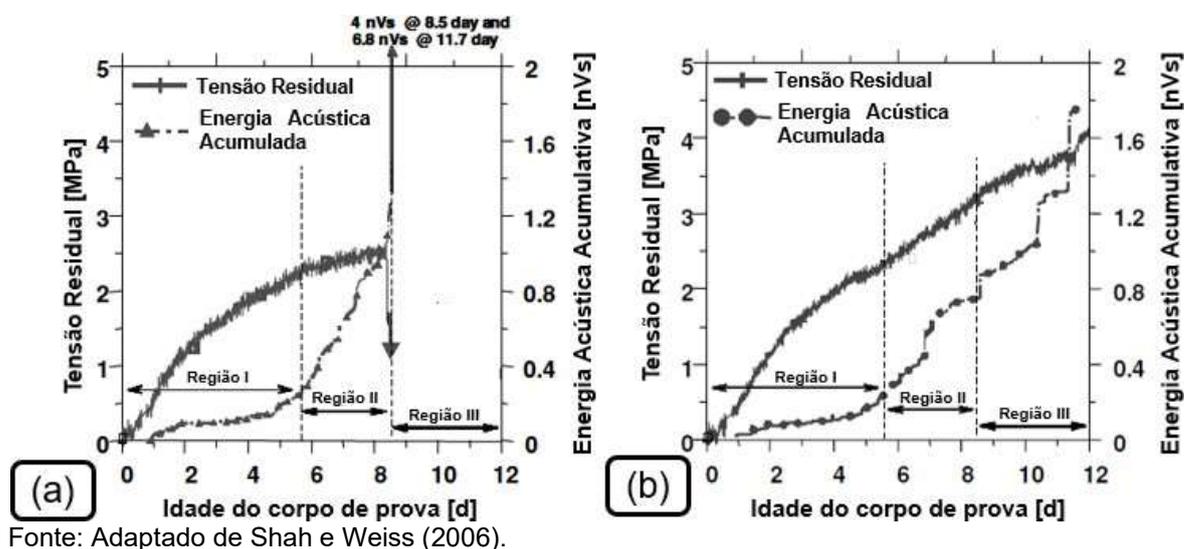
3.5. CRF no ensaio de retração restringida

Como abordado no capítulo 3.3 (pág. 34), distintos ensaios são propostos na literatura para avaliar o efeito da retração no concreto. Como decorrido anteriormente, a retração livre não é um indicador efetivo da atuação das fibras para reduzir a retração, pois não se trata em reduzir a deformação do concreto, mas sim à fissuração associada com a restrição da retração (BENTUR; MINDNESS, 1990).

Logo, a metodologia proposta pelo ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido vem sendo usualmente aplicada para avaliar a eficácia das fibras na matriz cimentícia ante o processo de fissuração associado à restrição.

Shah e Weiss (2006) avaliaram, por meio de emissão acústica, a iniciação e coalescência de microfissuras no concreto reforçado com fibras de aço ($V_f = 1\%$) aplicado no ensaio do anel restringido. Embasando-se nos resultados, os autores distinguiram o desenvolvimento da tensão em três regiões, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Desenvolvimento da tensão e energia acústica acumulada, em função do tempo, no (a) concreto simples; e (b) concreto reforçado com fibras



A Região I corresponde ao intervalo cujo concreto simples e reforçado com fibras exibem similarmente o desenvolvimento de tensão e liberação de energia acústica, uma vez que as fissuras não se manifestaram substancialmente a ponto de ativar o efeito de grampeamento das fibras. Na Região II, nota-se um acréscimo de tensão residual para o CRF, enquanto a amostra referência apresenta um patamar de estabilização seguido de uma queda abrupta – indício de fissuração

visível. Na Região III, notório ao CRF, ocorre um incremento na tensão residual, indicando a efetividade das fibras em absorverem energia e transferi-la através das fissuras.

A Tabela 3 indica estudos da literatura que buscaram investigar o efeito da adição de microfibras na matriz cimentícia. Buscou-se avaliar quatro parâmetros: (i) Metodologia de ensaio (ASTM C1581/C1581-18a ou AASHTO T 334-08); (ii) Origem da microfibras; (iii) Dosagem (em volume de concreto); e (iv) Diferença na idade de fissuração com relação à dosagem referência.

Tabela 3: Estudos do desempenho das microfibras [comparado à amostra referência] quanto à idade de fissuração dos anéis no ensaio de retração por secagem restringida

Referência	Metodologia	Tipo de fibra	Dosagem	Idade de fissuração [d] ¹
Passuello, Moriconi e Shah (2009)	ASTM	PVA	0,50%	+4,00
K. Choi, H. Choi e Kim (2015)	-	PP	0,20%	+1,50
Briffaut, Benboudjema e D'Aloia (2016)	-	PP	0,10%	0,00
Yousefieh <i>et al.</i> (2017)	ASTM	PP	0,20%	+0,75
Saradar <i>et al.</i> (2018)	ASTM	PP	0,10%	+8,00
		V-AR	0,10%	+2,00
Ehrenbring <i>et al.</i> (2019)	ASTM	PVA	0,50%	+1,00
		PP	0,50%	+1,00
Borges, Motta e Silva (2020)	ASTM	PP	0,25%	-2,25
		PP	0,10%	+8,00
		V-AR	0,10%	+2,00
Suksawang e Yohannes (2020)	ASTM	Basalto	0,10%	-1,00
		Náilon	0,10%	+7,00
			0,30%	+6,00
dos Santos Motta, Souza e de Andrade Silva (2021)	ASTM	PP	0,03%	+1,25
			0,13%	+0,75
			0,30%	+1,00
Wang <i>et al.</i> (2021)	ASTM	PP	0,13%	+0,50
		PVA	0,09%	+1,00

Fonte: Autoria própria.

Notas:

(1) Diferença da idade de fissuração do compósito reforçado com fibras com a amostra de referência.

Em princípio, o processo de fissuração é governado pela matriz cimentícia do compósito. Logo, espera-se que as fibras não modifiquem significativamente a idade de fissuração (PASSUELLO; MORICONI; SHAH, 2009).

Com base nesta afirmação, a maioria dos estudos [aplicando o ensaio do anel] obtiveram que o ponto de fissuração não distinguiu significativamente entre a amostra referência e àquelas com adição de microfibras (K. CHOI; H. CHOI; KIM, 2015; BRIFFAUT; BENDOUDJEMA; D'ALOIA, 2016; EHRENBRING, 2019; dos

SANTOS MOTTA; SOUZA; DE ANDRADE SILVA, 2021). Entretanto, tendências opostas foram obtidas por Saradar *et al.* (2018) e Suksawang e Yohannes (2020) com a adição de microfibras de polipropileno e náilon.

Yousefieh *et al.* (2017) investigaram a eficácia de fibras poliméricas e de aço na redução da retração por secagem e fissuração no ensaio do anel. Neste propósito, três fibras, em dosagens de 0,2% do volume de concreto, foram avaliadas: fibras de aço com ancoragem nas extremidades (diâmetro e comprimento de 0,022 e 12 mm, respectivamente), microfibras de polipropileno (diâmetro e comprimento de 0,022 e 12 mm, respectivamente) e macrofibras de poliolefina (diâmetro e comprimento de 1,07 e 48 mm, respectivamente).

Na amostra referência, após a ocorrência da fissuração, a deformação decresceu abruptamente próxima a zero. Nos compósitos reforçados com fibras, verificou-se um decréscimo gradual na deformação, como constatado por Shah e Weiss (2006), K. Choi, H. Choi e Kim (2015) e Ehrenbring (2019). De acordo com os autores, isso ocorre devido ao efeito proporcionado pelas fibras na transmissão de tensões entre as seções fissuradas, o qual possibilitou maior capacidade de deformação à tração.

Em contradição, estudos presentes na literatura também apontam tendências opostas – Briffaut, Benboudjema e D'Aloia (2016), Saradar *et al.* (2018) e Borges, Motta e Silva (2020) e Wang *et al.* (2021), onde foi verificado uma queda brusca na deformação para as amostras com adição de microfibra, assim como a amostra referência.

As fibras de aço, avaliadas no estudo de Yousefieh *et al.* (2017), possibilitou retardar a idade de formação da primeira fissura e aumentar significativamente a deformação máxima. As fibras sintéticas, por outro lado, apresentaram deformações no mesmo nível da amostra de referência e, conseqüentemente, pontos de fissuração próximos. Ressalta-se que as propriedades mecânicas das fibras sintéticas (e.g. módulo de elasticidade e resistência à tração) são inferiores ao aço, demonstrando a influência direta no desenvolvimento da deformação.

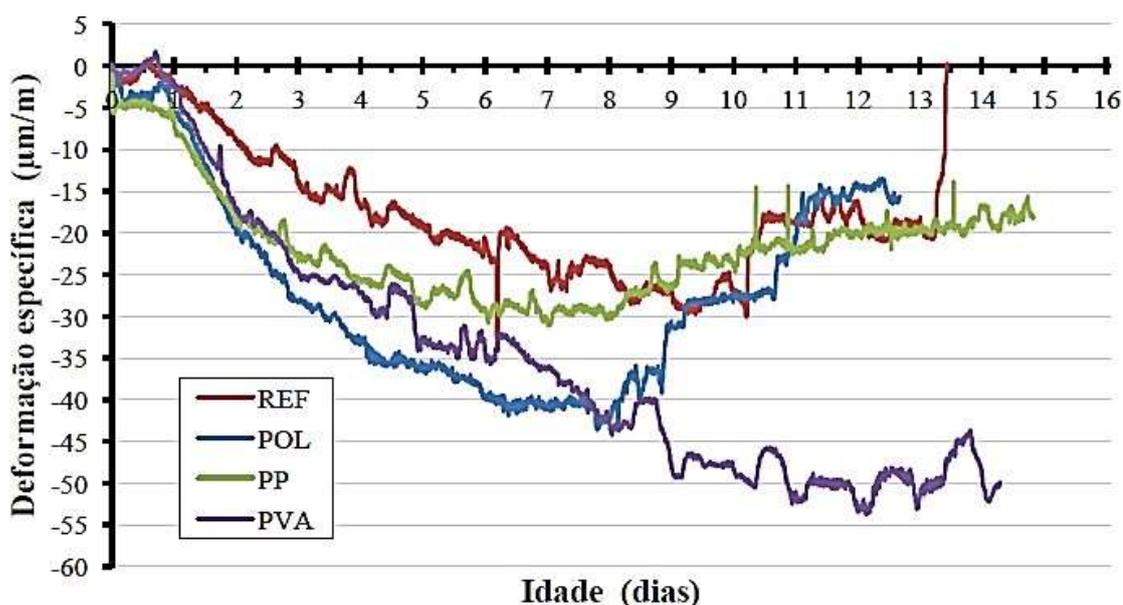
Briffaut, Benboudjema e D'Aloia (2016) compararam o desempenho à fissuração nas idades iniciais do concreto reforçado com micro- (0,90 e 1,80 kg/m³) e macrofibra (7,00 kg/m³) de polipropileno, para aplicação em revestimentos de túneis. Por meio do ensaio do anel, foi verificado que as microfibras não foram

eficientes para retardar o aparecimento da primeira fissura, como no caso das macrofibras. Os autores relatam que a redução no tempo de fissuração pode ser atribuída ao aumento da resistência à tração resultante do reforço da macrofibra.

A aplicação de fibras de aço com ancoragem dupla nas extremidades em concretos de alto desempenho foi estudada por Shen *et al.* (2019) com o intuito de reduzir a fissuração nas idades iniciais. Com base no ensaio do anel, concretos reforçados com fibras em teores de 0,12, 0,24 e 0,36% do volume de concreto não exibiram fissuras durante a execução do ensaio e as deformações do anel de aço diminuíram em 25%, 35,3% e 55,9% com o crescente aumento nas proporções das fibras.

Ehrenbring (2017) avaliou o potencial de fissuração de concretos reforçados com microfibras de PVA (diâmetro de 0,026 mm e comprimento de 6 mm) e polipropileno (diâmetro de 0,012 mm e comprimento de 6 mm), em uma dosagem de 0,5% do volume de concreto. A adição de microfibras de PVA resultou em uma deformação média máxima superior ao concreto referência, enquanto a de polipropileno manteve uma deformação similar – ver Figura 13. Cumpre salientar que as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e resistência à tração) das microfibras de PVA são superiores às demais aplicadas no estudo.

Figura 13: Curvas ‘Deformação específica versus Idade’ para o ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido



Fonte: Ehrenbring (2017).

Em complemento, Ehrenbring (2017) verificou, por meio da análise microscópica, a zona de interface fibra-matriz. Os reforços de PVA apresentavam maior quantidade de pasta cimentícia aderida, quando comparada às microfibras de polipropileno, indicando uma forte interação química. Por fim, a abertura de fissura foi mais notória ao concreto convencional, evidenciando, portanto, que as fibras alteram a forma de fratura do sistema.

Dentre as dosagens avaliadas por Suksawang e Yohannes (2020), a adição de microfibras de polipropileno ($V_f = 0,1\%$) e náilon ($V_f = 0,3\%$) possibilitaram reduzir consideravelmente a abertura de fissura. As amostras com microfibras de vidro, basalto e náilon, em uma dosagem de $0,1\%$ do volume de concreto, apresentaram aberturas de fissura na mesma intensidade manifestada pela amostra referência.

K. Choi, H. Choi e Kim (2015) adicionaram fibras de polipropileno (diâmetro e comprimento de $0,017$ e 12 mm, respectivamente) ao concreto convencional, em uma dosagem de $0,2\%$ do volume de concreto. A adição de fibras retardou o início da fissuração em dois dias e reduziu a abertura de fissura em 22% , comparado ao concreto convencional.

Com base nos dados evidenciados, enfatiza-se o principal ganho associado à adição de fibras – controle na propagação das fissuras. Segundo Lawler *et al.* (2003), a efetividade das microfibras está associada à menor distância entre as fibras ao invés de seu menor diâmetro.

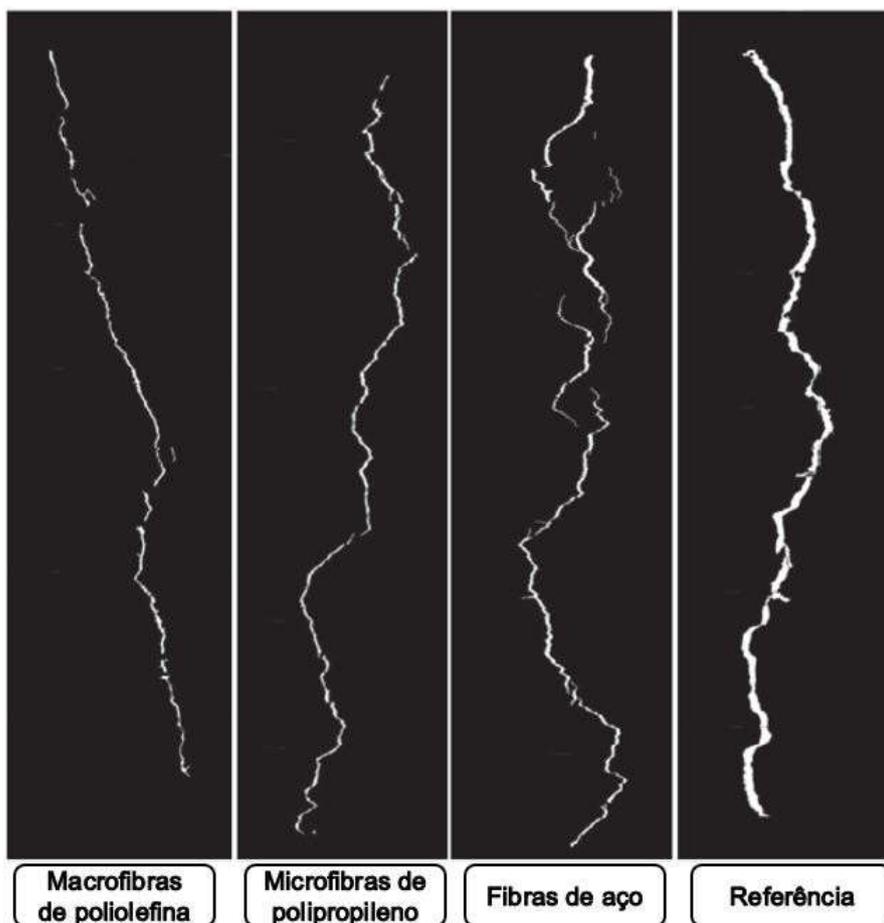
No caso do CRF, múltiplas macrofissuras podem se desenvolver na superfície do anel decorrente da restrição interna proporcionada pela presença das fibras, enquanto a amostra referência exibe usualmente uma ou duas fissuras expressivas (KWON *et al.*, 2007; PASSUELLO; MORICONI; SHAH, 2009).

Saradar *et al.* (2018) observaram a manifestação patológica ocorrendo de duas maneiras: (i) fissuras superficiais; e (ii) fissuras profundas. A dosagem com microfibras de polipropileno, cujo desenvolvimento da deformação não apresentou uma queda brusca, proporcionou numa redução de 84% na abertura de fissuras e não acarretou o seu desenvolvimento profundo.

Conforme Yousefieh *et al.* (2017), as propriedades físicas das fibras também influenciam na redução da abertura de fissuras. Em seu estudo, as fibras de aço apresentaram um melhor desempenho em função da ancoragem nas extremidades das fibras, incrementando a aderência entre a fibra e a matriz. Em

adição, aspectos como rugosidade da superfície e comprimento das fibras também surtem efeito na aderência. Conforme ilustrado na Figura 14, as matrizes reforçadas com fibras manifestaram um padrão de fissuração distinto do concreto referência, visto as menores dimensões e desenvolvimento estilo *hairline* (abertura de fissura fina com descontinuidades ao longo de sua extensão).

Figura 14: Comparação do padrão de fissura (ilustração binária) entre a amostra referência com àquelas contendo microfibras de polipropileno, macrofibras de poliolefina, fibras de aço



Fonte: Adaptado de Yousefieh *et al.* (2017).

Passuello, Moriconi, Shah (2009) avaliaram o desempenho da adição de macro- e microfibras de PVA na abertura da fissura ($V_f = 0,5\%$ do volume de concreto), ao longo do tempo, no ensaio do anel. Em comparação com a amostra referência, ambas as fibras proporcionaram na redução da abertura de fissura na ordem de 90%. Todavia, as microfibras de PVA mantiveram, concomitantemente, uma espessura de fissura constante ao longo do tempo. Portanto, de fato, a menor geometria e a maior concentração de microfibras no concreto possibilitam aumentar a área de contato entre a matriz cimentícia e a fissura, controlando a abertura da fissura.

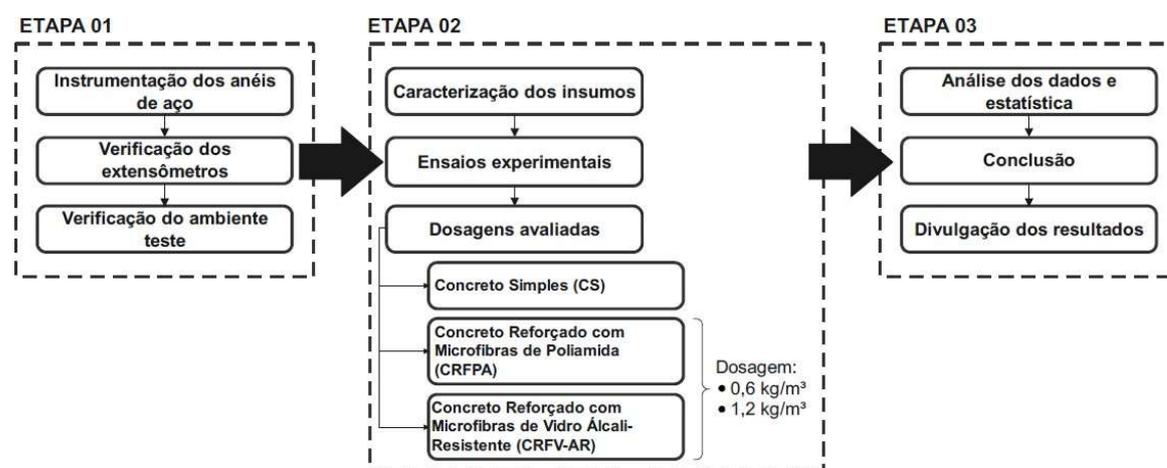
4. METODOLOGIA

A presente dissertação contempla uma pesquisa experimental e explicativa que busca investigar o fenômeno da retração por secagem nas idades iniciais do concreto e sua relação com a adição de microfibras. As variáveis serão o tipo de microfibra (poliamida e vidro álcali-resistente) e suas dosagens. Busca-se avaliar os resultados com uma abordagem qualitativa e quantitativa, articulando-os com estudos de revisão bibliográfica.

Neste sentido, o programa experimental avaliou o comportamento dos compósitos quando submetidos à retração por secagem nas idades iniciais conforme a metodologia proposta pela ASTM C1581/C1581M (2018).

Conforme esquematizado no fluxograma apresentado na Figura 15, o programa experimental foi dividido em três partes intrínsecas.

Figura 15: Proposta metodológica desta dissertação



Fonte: Autoria própria.

A ETAPA 01 compreendeu a instrumentação dos extensômetros nos anéis de aço. Sequencialmente, os anéis foram expostos às condições ambientais para verificar a influência da variação de temperatura nas leituras registradas pelos extensômetros.

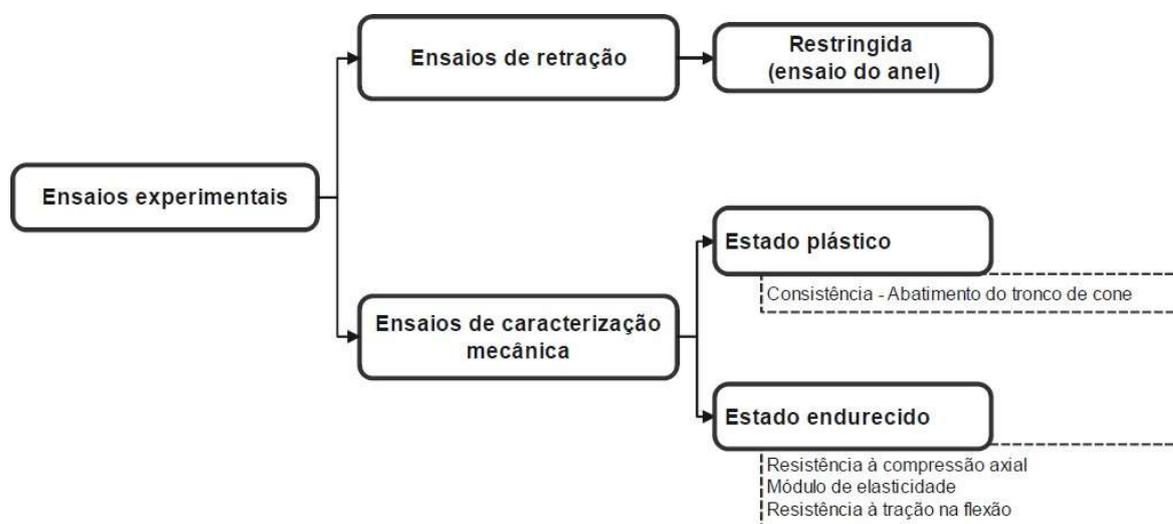
O APÊNDICE A apresenta um estudo desenvolvido em conjunto com o grupo de Tecnologia do Ambiente Construído da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, o qual avaliou o desempenho dos compósitos no ensaio de retração por secagem restringida em diferentes ambientes teste.

Na ETAPA 02 da proposta metodológica, antecedente ao início das concretagens, realizaram-se os ensaios de caracterização dos insumos

necessários para a produção do concreto, conforme as especificações dos documentos técnicos vigentes.

Na presente dissertação, duas microfibras de origens distintas foram avaliadas – poliamida e vidro álcali-resistente, em dosagens de 0,60 e 1,20 kg/m³ do volume de concreto, com o intuito de aferir o melhor teor ao controle da fissuração por retração conforme o ensaio do anel restringido. Ressalta-se que ensaios de caracterização mecânica, conforme retratado na Figura 16, foram realizados para cada concretagem.

Figura 16: Detalhamento dos ensaios experimentais adotados para cada concretagem



Fonte: Autoria própria.

A ETAPA 03 contempla a análise e tratamento dos dados obtidos nos ensaios descritos na metodologia, buscando discuti-los com base nos objetivos e hipóteses estabelecidos anteriormente. Por fim, apresenta-se as conclusões e considerações finais acerca do tema investigado.

4.1. Caracterização dos insumos

Os agregados de origem natural, destinados à produção de concretos de cimento Portland, atendem aos requisitos da ABNT NBR 7211 (2009a). As normas regulamentadoras que prescrevem os ensaios de caracterização dos agregados são compiladas na Tabela 4.

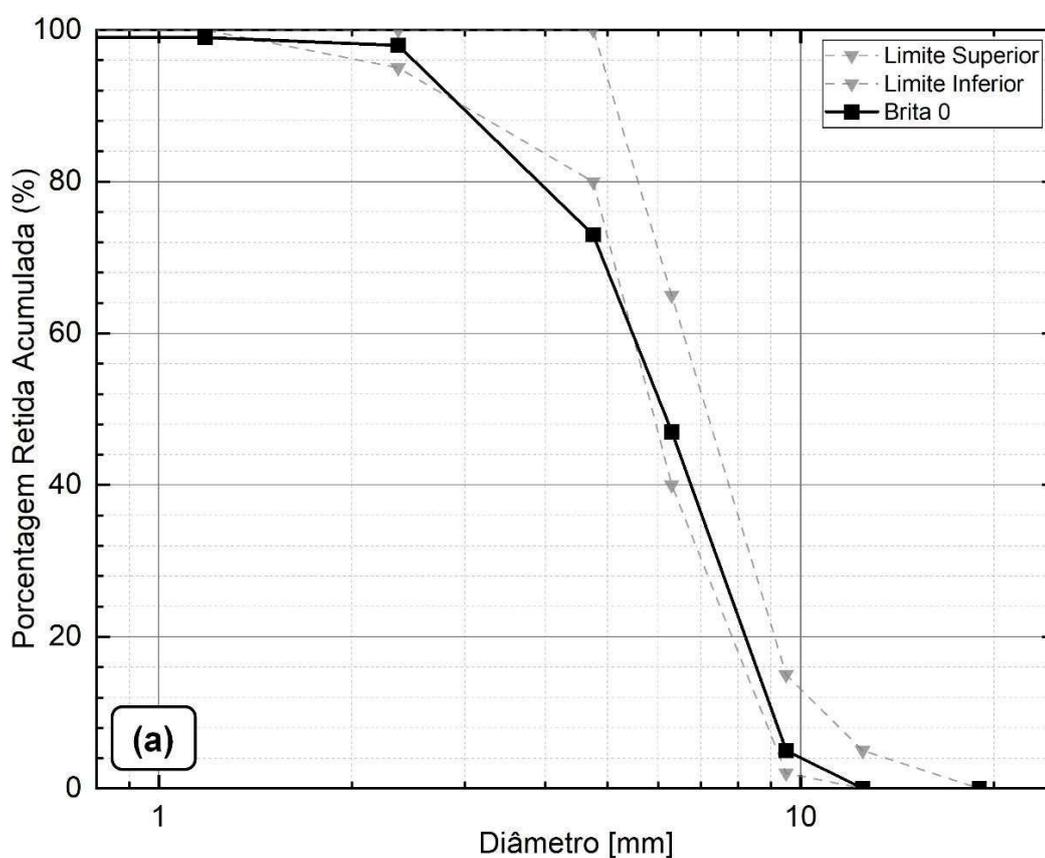
Tabela 4: Ensaio para a caracterização do concreto no estado endurecido

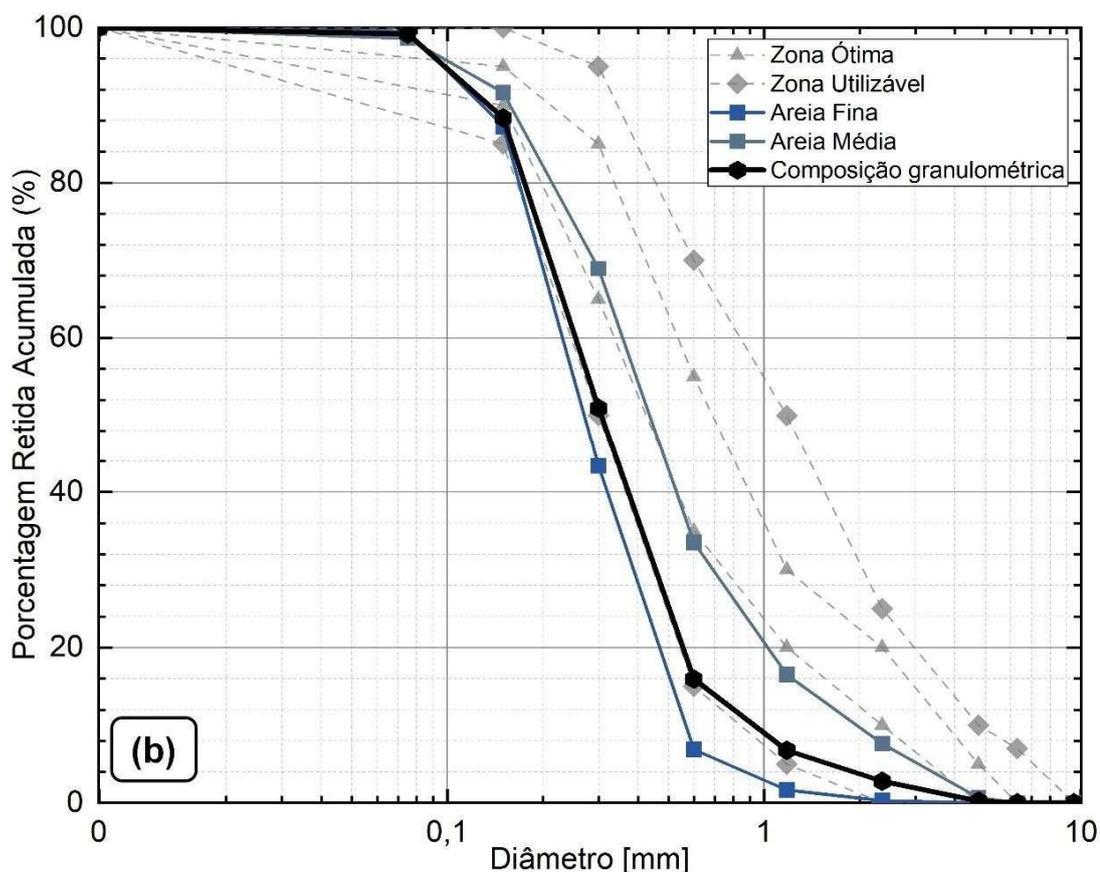
Ensaio	Documento normativo
Agregado miúdo	
Composição granulométrica	ABNT NBR 17054 (2022)
Densidades e absorção	ABNT NBR 16916 (2021b)
Agregado graúdo	
Composição granulométrica	ABNT NBR 17054 (2022)
Densidades e absorção	ABNT NBR 16917 (2021c)

Fonte: Autoria própria.

As composições granulométricas e propriedades dos agregados miúdos e graúdos são apresentados na Figura 17 e Tabela 5.

Figura 17: Curvas granulométricas do (a) agregado graúdo; e (b) agregado miúdo





Fonte: Autoria própria.

Notas:

(1) Composição granulométrica do agregado miúdo composta por aproximadamente 65% de areia fina e 35% de areia média (ver consumo na Tabela 8).

Tabela 5: Propriedades dos agregados analisados – massa específica e absorção de água

Propriedade	Brita 0	Areia média	Areia fina
Módulo de finura	5,73	2,19	1,39
Dimensão máxima característica [mm]	9,50	4,75	1,18
Massa específica [g/cm ³]	2,77	2,60	2,51
Absorção de água [%]	0,95	0,39%	0,30%

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 17a, observa-se que a curva do agregado graúdo extrapola o limite inferior da peneira com abertura de malha 4,75 mm e a curva granulométrica da areia fina e encontra abaixo do limite inferior da zona utilizável. Entretanto, nota-se que a composição granulométrica das areias (média e fina) se enquadra dentro da zona utilizável.

O cimento utilizado neste estudo foi o CP V-ARI.

A água utilizada no experimento foi provida do abastecimento da rede pública, cuja responsabilidade é competente à Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S/A (SANASA). Nestas condições, segundo ABNT NBR

15900-1 (2009b), essa água é considerada adequada para amassamento do concreto, isentando-a de ser ensaiada.

O aditivo adotado foi o MC-TechniFlow 525, o qual se trata de um plastificante multifuncional *mid-range* de pega normal (RA2). Segundo a ficha técnica fornecida pelo fabricante (MC-BAUCHEMIE Indústria e Comércio LTDA, 2022), o aditivo possui uma densidade de 1,18 kg/L e intervalo de dosagem recomendado de $0,2\% \leq RA2 \leq 2,0\%$ (sobre a massa do cimento).

Para os concretos com reforço descontínuo, adicionou-se microfibras de polipropileno e poliamida (ver Figura 18). Os requisitos das fibras poliméricas e de vidro álcali-resistente são preconizados, respectivamente, pela ABNT NBR 16942 (2021d) e ABNT NBR 16941 (2021e).

Figura 18: Ilustração das microfibras de polipropileno e poliamida avaliadas neste estudo



Fonte: Autoria própria.

A classificação das fibras, conforme as normativas, é apresentada na Tabela 6. Neste caso, ambas as fibras são classificadas na Classe I: microfibras (diâmetro < 0,30 mm).

Tabela 6: Classificação das fibras poliméricas e de vidro álcali-resistente

Norma regulamentadora	Classificação		Diâmetro [mm]	Apresentação
Fibras poliméricas				
ABNT NBR 16942 (2021d)	Classe I	Microfibra	< 0,30	Não especificado
	Classe II	Macrofibra	> 0,30	
Fibras de vidro álcali-resistente (AR)				
ABNT NBR 16941 (2021e)	Classe Ia	Microfibra	< 0,30	Monofilamento
	Classe Ib			Integral
	Classe II	Macrofibra	> 0,30	Não especificado

Fonte: Autoria própria.

As propriedades das fibras, de acordo com os fabricantes, são especificadas na Tabela 7.

Tabela 7: Propriedades das fibras

Propriedades	Microfibras	
	Poliamida (PA) ¹	Vidro álcali-resistente (V-AR) ²
Material	Poliamida 6.6	Vidro álcali-resistente (AR)
Densidade [kg/m ³]	1140	2680
Diâmetro [µm]	27	14
Ponto de fusão [°C]	260	-
Comprimento [mm]	12	12
Alongamento na ruptura	17,55%	-
Resistência à tração [MPa]	900	>1.000
Módulo de elasticidade [GPa]	-	72
Fibras/kg	111.000.000	200.000.000

Fonte: (1) Kordsa [s.d.]; e (2) Owens Corning (2021).

A microfibra V-AR foi projetada para prover controle à fissuração por retração plástica (OWENS CORNING, 2021). Por sua vez, a microfibra de poliamida é um monofilamento à base de polímero que fornece controle efetivo à fissuração por retração plástica a curto prazo e à fissuração devido à retração por secagem a longo prazo (KORDSA, s.d.). As fichas técnicas fornecidas pelas empresas recomendam uma dosagem mínima de 0,6 kg/m³.

4.2. Dosagem do concreto

Os concretos foram produzidos com cimento CP V-ARI, agregado graúdo (brita 0), agregado miúdo (composição entre duas areias – fina e média), aditivo RA2 e microfibras de poliamida e vidro álcali-resistente, cujas propriedades foram mencionadas anteriormente (item 4.1).

Tabela 8: Consumo, em [kg/m³], dos insumos para a confecção de cada dosagem

Insumos [kg/m ³]	CS	CFRPA	CRFV-AR
Cimento	370,00	370,00	370,00
Água	185,00	185,00	185,00
Areia fina	536,50	536,50	536,50
Areia média	284,90	284,90	284,90
Brita 0	1057,34	1057,34	1057,34
Microfibra de poliamida	-	0,600 / 1,200 (0,053% / 0,105%)	-
Microfibra de vidro álcali-resistente	-	-	0,600 / 1,200 (0,022% / 0,045%)
Aditivo RA2	2,22	2,22	2,22

Fonte: Autoria própria.

O traço dosado foi projetado para aplicação em pisos industriais. No total, três variações foram adotadas, sendo: concreto simples (CS), concreto reforçado com microfibras de poliamida (CFRPA) e concreto reforçado com

microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR). O consumo dos insumos para a confecção dos concretos está apresentado na Tabela 8. Todos os concretos foram produzidos com agregados de mesmo lote, tipo de aditivo e cimento.

O concreto foi produzido no Laboratório de Estruturas e Materiais da Pontifícia Universidade Católica de Campinas com auxílio de uma betoneira de eixo inclinado. A moldagem dos corpos de prova seguiu os procedimentos preconizados pela ABNT NBR 5738 (2015a).

Os seguintes procedimentos de mistura foram adotados: (i) inicialmente, misturaram-se os agregados graúdos e 1/3 da água por 120 s; (ii) posteriormente, adicionou-se o cimento e mais 1/3 da água, seguido de 120 s para mistura; (iii) sequencialmente, misturaram-se os agregados miúdos e o restante da água por 120 s, sendo as microfibras adicionadas de maneira aleatória e manual nesta etapa; (iv) por fim, adicionou-se o aditivo e o processo de mistura continuou por mais 5 minutos até homogeneização.

4.2.1. Ensaios de caracterização do concreto

A Tabela 9 apresenta os documentos normativos vigentes adotados para os ensaios de caracterização do concreto, assim como a quantidade mínima de exemplares confeccionados.

Tabela 9: Normativas e quantidade de exemplares para ensaios de caracterização do concreto no estado plástico e endurecido

Ensaio	Documento normativo	Total
Estado plástico		
Consistência pelo abatimento do tronco de cone	ABNT NBR 16889 (2020b)	1
Estado endurecido		
Resistência à compressão axial	ABNT NBR 5739 (2018)	10 ¹
Resistência à tração na flexão	ABNT NBR 12142 (2010)	10 ¹
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522-1 (2021f)	5

Fonte: A autoria própria.

Notas:

- (1) Metade dos exemplares foram ensaiados na idade de fissuração dos anéis – resultados apresentados na Tabela 14 (página 78). Os ensaios dos demais corpos de prova foram destinados para caracterização do compósito aos 28 dias.

No estado fresco, a consistência do concreto foi determinada pelo mesmo operador e posteriormente aferida com auxílio de uma trena com precisão de $\pm 0,5$ mm, cujos resultados e classificação, segundo a ABNT NBR 8953 (2015b), são compilados na Tabela 10.

A incorporação de fibras na matriz cimentícia resulta na perda de trabalhabilidade, cujo fator depende majoritariamente do volume adicionado (MEHTA; MONTEIRO, 2013; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Logo, assim como esperado, a adição de microfibras resultou no decréscimo do abatimento do tronco de cone. Observa-se que a consistência das dosagens com volume de fibra de 0,6 kg/m³ foram próximas à dosagem referência, cuja redução no abatimento do tronco de cone foi de 10 mm e 25 mm para as amostras CRFPA/0,6 e CRFV-AR/0,6, respectivamente.

Em adição, nota-se uma redução intensificada da consistência com o incremento da dosagem, onde as amostras CRFPA/1,2 e CRFV-AR/1,2 se enquadram nas classes de consistência S50 ($50 \leq \text{Abatimento} < 100$).

Tabela 10: Abatimento do tronco de cone para os distintos traços

Grupo	Resultado	Variação [%] ¹	Classe ²
Abatimento do tronco de cone [mm]			
CS	180	-	S160
CRFPA/0,6	170	-5,56	S160
CRFV-AR/0,6	155	-13,89	S100
CRFPA/1,2	95	-47,22	S50
CRFV-AR/1,2	65	-63,89	S50

Fonte: Autoria própria.

Notas:

(1) Variação calculada com relação ao concreto simples;

(2) Classe atribuída conforme a ABNT NBR 8953 (2015b).

A perda de trabalhabilidade foi mais acentuada para o concreto contendo microfibras de vidro álcali-resistente. Essa tendência é oriunda da maior concentração de fibras/kg apresentada pela microfibra V-AR quando comparada com a PA, considerando uma mesma dosagem (conferir proporções na Tabela 7).

Apesar da adição de microfibras ter resultado no decréscimo da consistência do concreto, especialmente nas dosagens CRFPA/1,2 e CRFV-AR/1,2, não se constatou falhas de moldagem decorrentes do adensamento do concreto nos moldes.

A Tabela 11 apresenta os resultados estatísticos dos ensaios, aos 28 dias, de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade para os compósitos analisados.

Tabela 11: Ensaios de caracterização mecânica para as dosagens avaliadas

Grupo	Contagem	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação [%]
Resistência à compressão axial [MPa]				
CS	4	54,277	3,094	5,847
CRFPA/0,6	5	63,209	1,019	1,611
CRFV-AR/0,6	5	45,645	2,330	5,301
CRFPA/1,2 ¹	=	=	=	=
CRFV-AR/1,2	5	54,488	2,394	4,393
Resistência à tração na flexão [MPa]				
CS	5	9,485	0,647	6,822
CRFPA/0,6	5	8,023	0,316	3,935
CRFV-AR/0,6	5	9,258	0,548	5,756
CRFPA/1,2	5	9,487	0,393	4,145
CRFV-AR/1,2	4	9,265	0,541	5,843
Módulo de elasticidade [GPa]				
CS	4	45,950	4,985	10,934
CRFPA/0,6	5	42,096	3,024	7,184
CRFV-AR/0,6	5	43,128	3,898	9,039
CRFPA/1,2 ¹	=	=	=	=
CRFV-AR/1,2	5	45,828	2,235	4,878

Fonte: Autoria própria.

Notas:

- (1) Os resultados de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade para a amostra CRFPA/1,2 foram desconsideradas devido à incoerência experimental, cujos valores foram prejudicados devido à calibração errônea da prensa utilizada para ensaio.

Ao final do experimento, os corpos de prova de concreto foram descartados em uma caçamba, cujo contrato é competente à instituição. Com isso, assume-se que os resíduos foram destinados à um aterro apropriado, onde o concreto poderá posteriormente ser reciclado.

A presença de dados espúrios foi averiguada segundo método de Grubbs (1969), tanto com relação ao valor superior quanto ao inferior. Neste caso, adotou-se um nível de significância de 5%.

Finalizado o tratamento dos dados espúrios, aplicou-se a técnica estatística denominada 'análise de variância' (ANOVA) com a finalidade de aferir se há variações significativas entre os grupos de concreto analisados. O teste analisa duas hipótese (Equação 1), denominadas H_0 (hipótese nula) e H_1 (hipótese alternativa). A Tabela 12 compila os resultados obtidos.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_5$$

H_1 : Pelo menos uma das médias se difere das demais

Equação 1

Tabela 12: Análise de variância (ANOVA) das propriedades do concreto no estado endurecido

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Resistência à compressão axial						
Entre grupos	771,410	3	257,137	109,5371	2,006E-10	3,287
Dentro dos grupos	35,212	15	2,347			
Resistência à tração na flexão						
Entre grupos	8,252	4	2,063	8,209	5,073E-04	2,895
Dentro dos grupos	4,774	19	0,251			
Módulo de elasticidade						
Entre grupos	48,610	3	16,203	1,267	3,215E-01	3,287
Dentro dos grupos	191,902	15	12,793			

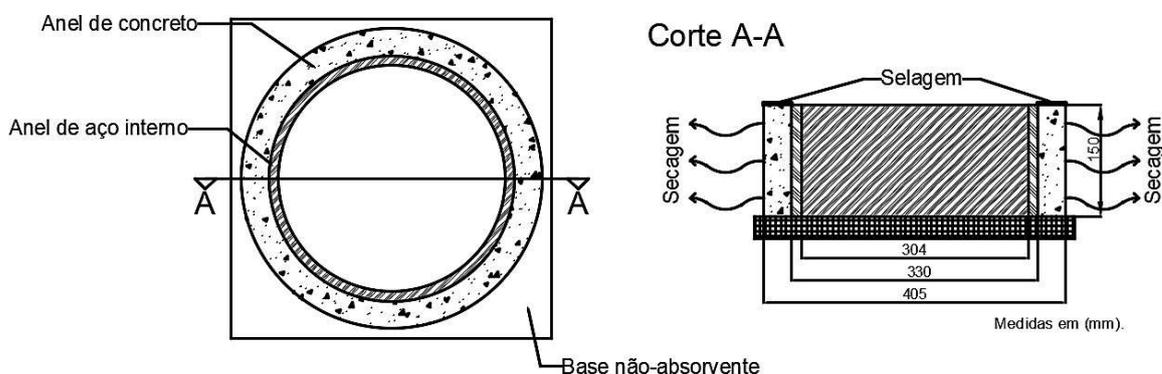
Fonte: Autoria própria.

O ensaio de módulo de elasticidade resultou em um valor-P maior que o valor significativo, indicando, dessa forma, que não há diferença significativa entre as amostras analisadas. Portanto, aceita-se a hipótese nula. Entretanto, apesar dos resultados das propriedades mecânicas estarem próximas, o teste ANOVA indicou que pelo menos uma das médias se difere de forma significativa das demais nos ensaios de resistência à compressão axial e tração na flexão.

4.3. Ensaio de retração por secagem restringida

O ensaio proposto pela ASTM C1581/C1581M-18a, cuja finalidade está em avaliar a idade de fissuração e a tensão de tração induzida em materiais cimentícios, é composto por um anel de concreto moldado ao entorno de um anel de aço (ver dimensões esquematizadas na Figura 19), o qual provê uma restrição passiva ao concreto (ACI 231R, 2010).

Figura 19: Dimensões do corpo de prova para o ensaio de retração pelo método do anel restringido

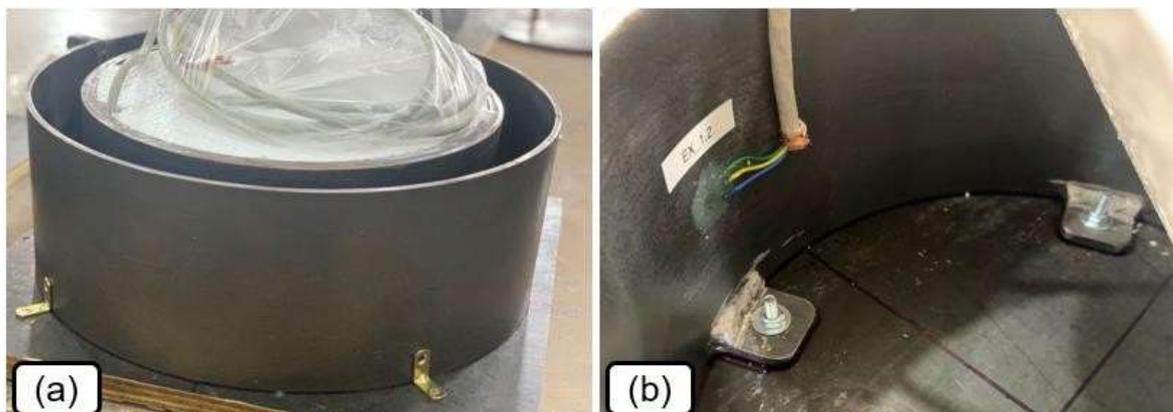


Fonte: Autoria própria.

Os anéis de aço externos e internos foram fixados, respectivamente, por meio de cantoneiras (ver Figura 20a) e parafusos com arruelas excêntricas (ver

Figura 20b) em uma base não-absorvente [em chapa de compensado plastificado], cuja finalidade estava em mantê-los fixos durante a concretagem.

Figura 20: Fixação dos anéis de aço com parafusos, sendo (a) anel externo; e (b) anel interno

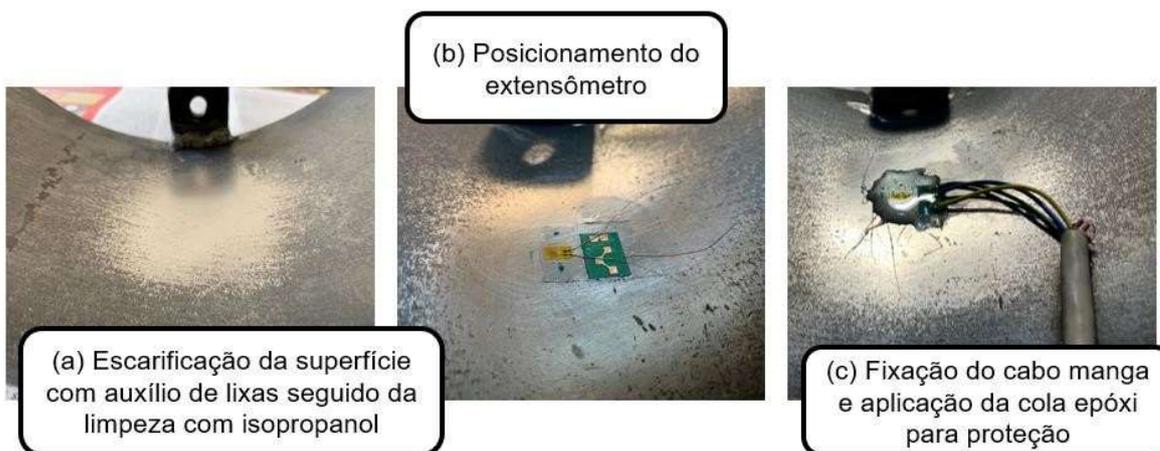


Fonte: Autoria própria.

4.3.1. Extensometria

Com auxílio de dois extensômetros, diametralmente opostos, orientados na meia altura da face interior do núcleo de aço, mede-se a deformação à compressão desenvolvida no anel de aço interno devido à retração do concreto. A Figura 21 esquematiza o procedimento de instalação dos extensômetros.

Figura 21: Procedimento de instalação dos extensômetros



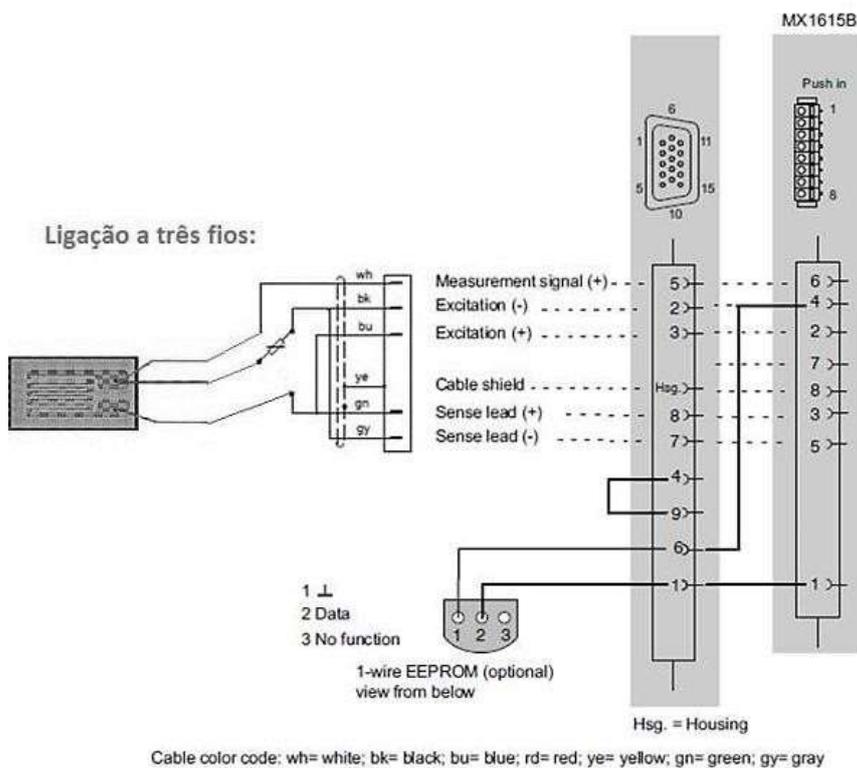
Fonte: Autoria própria.

Aplicou-se extensômetros modelo PA-06-125BA-120L. Os sensores são extensômetros auto-compensados, ou seja, as deformações térmicas correspondentes a um determinado coeficiente não se somarão às deformações mecânicas.

Os extensômetros foram conectados a três fios com circuito *half bridge* e então ligados por meio de um cabo de conexão no conector DB15 (componentes),

conforme modelo ilustrado na Figura 22. No total, três anéis foram instrumentados com, no mínimo, dois extensômetros diametralmente opostos.

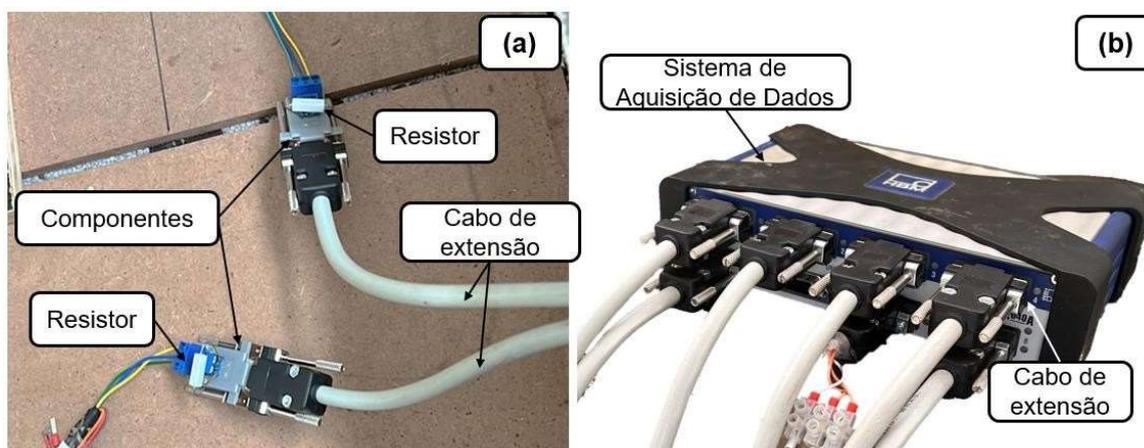
Figura 22: Conexão do extensômetro no cabo de comunicação e especificação do componente.



Fonte: Adaptado de Hottinger Brüel & Kjaer GmbH (2021).

Por fim, os componentes são conectados, por meio de cabos de extensão (ver Figura 23a), ao sistema de aquisição de dados compacto HBM – amplificador de medição universal QuantumX MX840B (ver Figura 23b), com 8 canais disponíveis.

Figura 23: Detalhe genérico (a) conexão entre os componentes e os cabos de extensão; e (b) conexão entre os cabos de extensão ao sistema de aquisição de dados



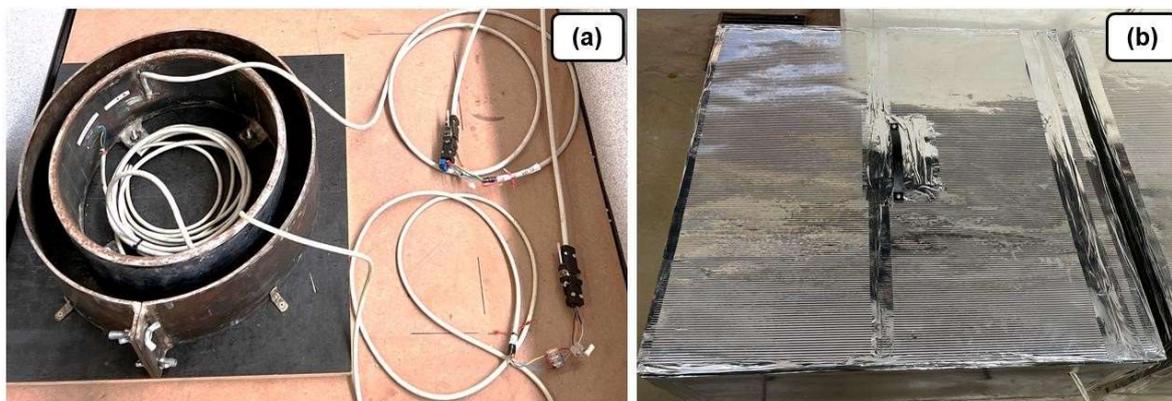
Fonte: Autoria própria.

4.3.2. Ambiente teste

A normativa prescreve que os corpos de prova devem ser mantidos em ambiente controlado, com temperatura do ar de $23,0 \pm 2,0$ °C e umidade relativa de 50 ± 4 % constantes. Como limitação do presente estudo, em cumprimento à normativa, os anéis de concreto foram armazenados em ‘caixas de ensaio’, as quais possuem dimensão de 1,0 m x 1,0 m x 0,4 m.

A sua estrutura consiste em chapas de compensado pinus de 15 mm de espessura. Internamente, todas as faces foram revestidas com placas moldadas de poliestireno expandido (EPS) de 25 mm de espessura, com densidade e condutividade térmica de $27,5$ kg/m³ e $0,034$ W/(m·K), respectivamente. Externamente, as caixas foram revestidas com folhas de alumínio corrugado com barreira (papel *kraft*) de 0,15 mm de espessura. A Figura 24a ilustra o interior da ‘caixa de ensaio’ descrita anteriormente, enquanto a Figura 24b o seu exterior. Em adição, cada caixa possui um furo médio de 20 mm, possibilitando assim a passagem dos cabos de comunicação.

Figura 24: Ilustração da ‘caixa de ensaio’, sendo: (a) interior; e (b) isolada.



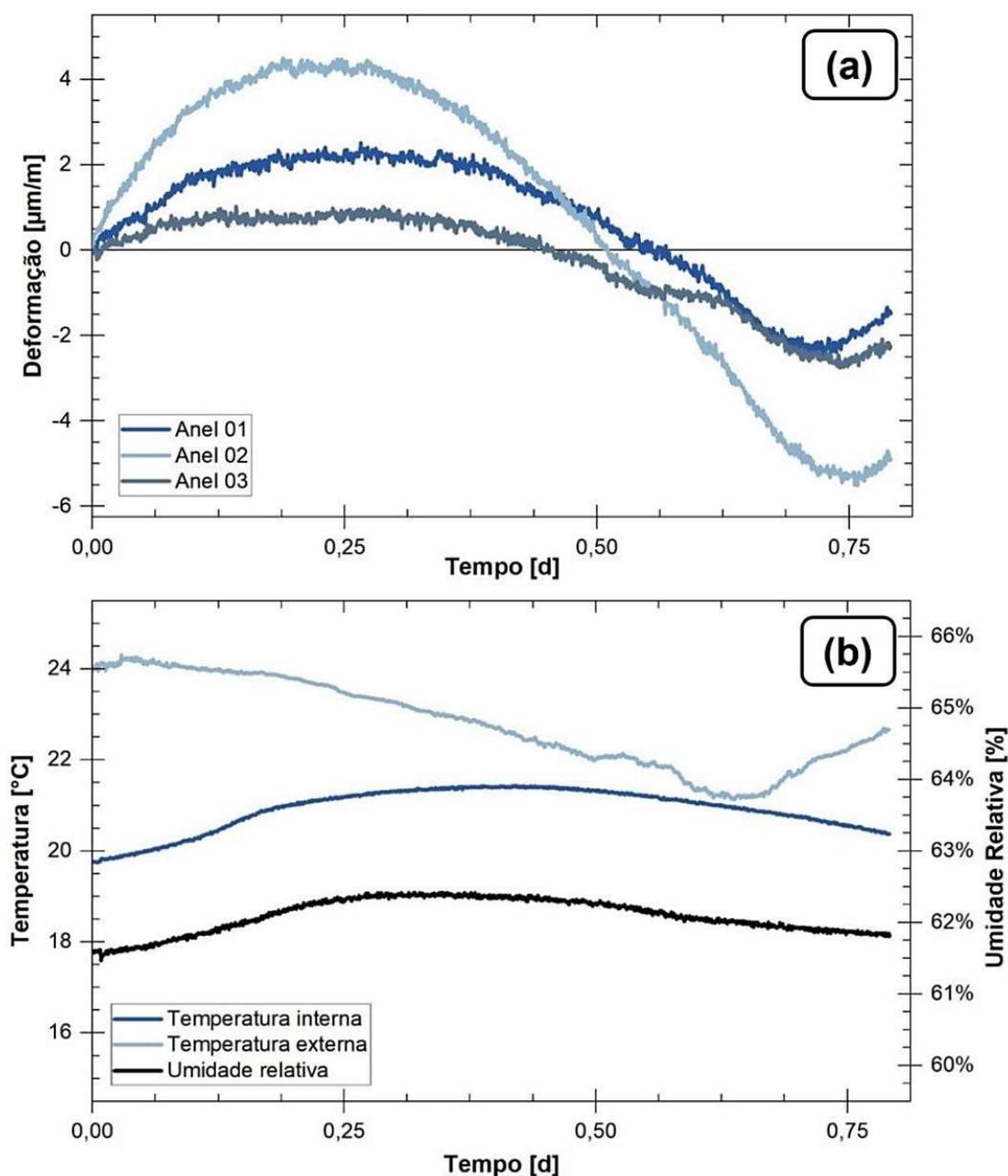
Fonte: Autoria própria.

A temperatura do ambiente externo foi monitorada com auxílio de uma sonda lambda. Por sua vez, a apuração das condições no interior das ‘caixas de ensaio’ foi realizada com auxílio de um sensor sem fio com precisão de $\pm 1,5\%$ RH/ $\pm 0,1$ °C para umidade relativa e temperatura, respectivamente – HTP.xw Sensor.

4.3.2.1. Verificação do ambiente teste

Visando verificar o desempenho dos extensômetros e da aquisição dos dados, os anéis e componentes foram mantidos dentro das 'caixas de ensaio' (vide Figura 24a), sendo conectados ao HBM por meio da extensão.

Gráfico 1: Desenvolvimento da curva 'Deformação do anel de aço interno' (a) nas condições do ambiente teste (b)



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 1a apresenta o desenvolvimento da deformação do anel de aço interno em função da variação de temperatura interna à 'caixa de ensaio'.

A amplitude térmica no interior da 'caixa de ensaio' foi cerca de 71% inferior àquela externa, como apresentado no Gráfico 1b. Como resultado, o Gráfico 1a indica a deformação dos anéis de aço decorrente das condições do ambiente teste. Considerando uma variação de temperatura de $\Delta = -0,735^{\circ}\text{C}$ (período compreendido entre as idades [0,237;0,682] dias), os Anéis 01, 02 e 03 apresentaram uma variação de deformação de $-4,296 \mu\text{m/m}$, $-8,627 \mu\text{m/m}$ e $-2,984 \mu\text{m/m}$, respectivamente.

4.3.3. Moldagem dos anéis de concreto

Antes do início da moldagem, aplicou-se uma fina camada de desmoldante nas superfícies internas dos anéis de aço, visando assim facilitar a sua posterior retirada.

Os anéis de concreto foram moldados em duas camadas, efetuando 75 golpes/camada com auxílio de uma haste metálica de 10 mm de diâmetro, seguido de um adensamento com mesa vibratória durante 1 min 30 s.

Imediatamente após a concretagem, os anéis foram transferidos para o ambiente teste. Os corpos de prova foram submetidos a uma cura úmida nos próprios moldes usando mantas umedecidas (ver Figura 25a). Salienta-se que as 'caixas de ensaio' foram mantidas abertas durante o período de cura, conforme discussão decorrida no APÊNDICE A.

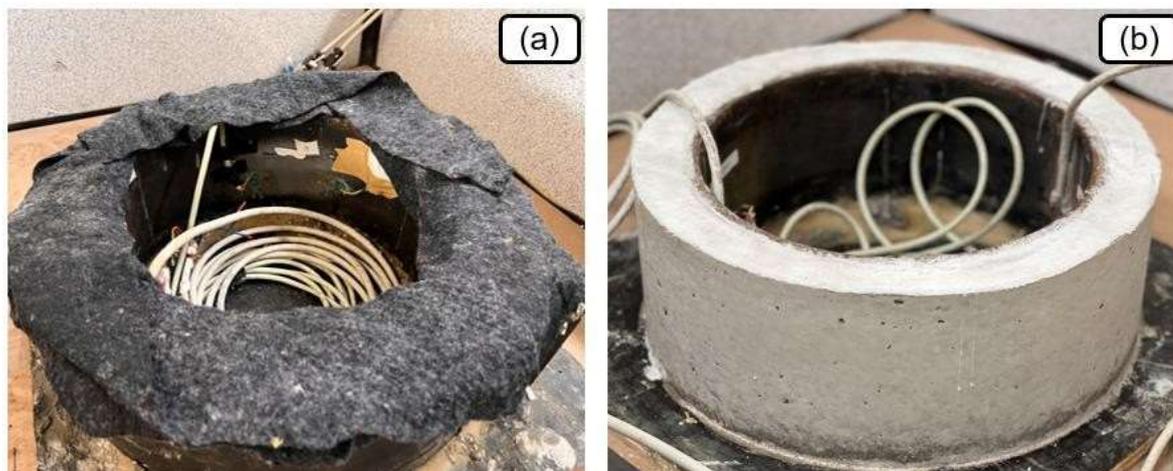
Então, iniciou-se o registro da deformação do anel de aço interno, cujos valores iniciais são decorrentes do calor de hidratação do cimento e da retração autógena (ASTM C1581/C1581, 2018).

Após 24 h, o processo de cura foi cessado e então retirou-se o anel de aço externo. Em seguida, a superfície do topo foi selada com parafina, como apresentado na Figura 25b. Os anéis foram mantidos nesta configuração, com as 'caixas de ensaio' fechadas, até término do ensaio.

Com a superfície do topo selada e o corpo de prova com sua base apoiada, o processo de secagem ocorreu somente pela superfície do anel de concreto externa.

Assume-se a fissuração como função da retração por secagem e autógena e o calor de hidratação do cimento. Considerou-se o seguinte critério de parada: idade de fissuração ou 28 dias.

Figura 25: (a) processo de cura úmida no anel de concreto; e (b) aplicação da parafina no topo do corpo de prova

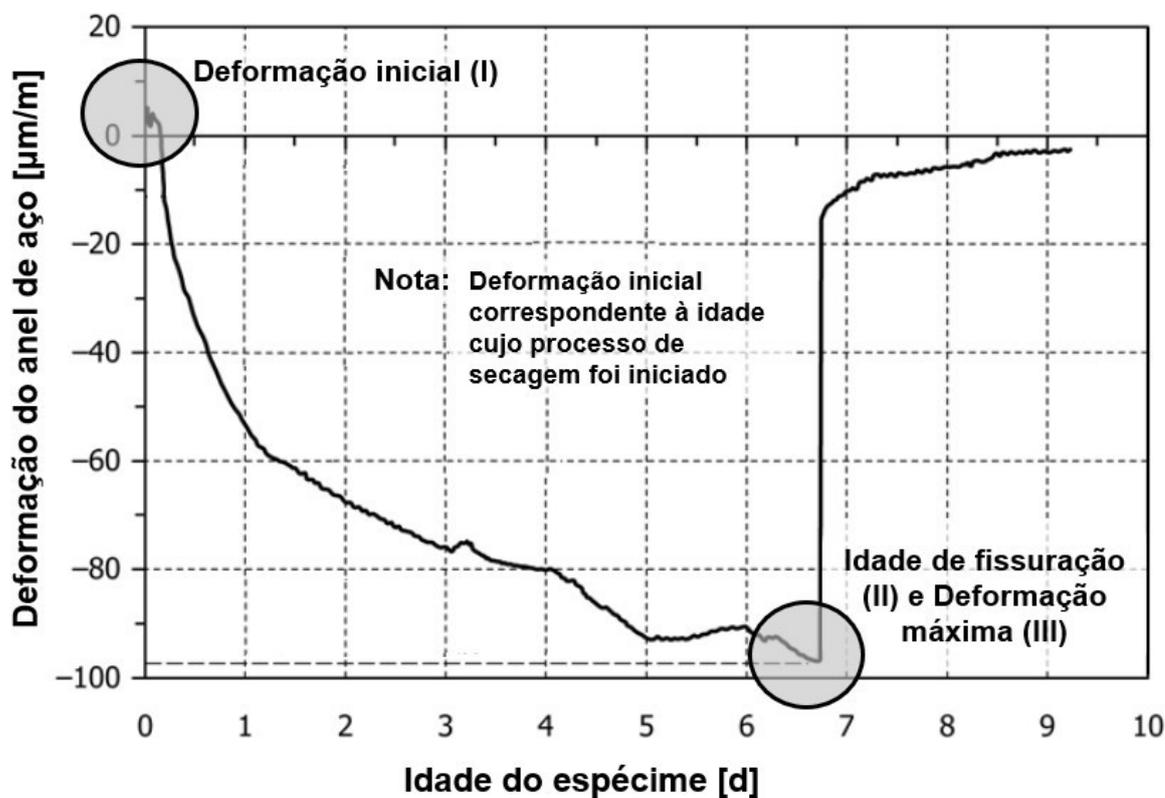


Fonte: Autoria própria.

4.3.4. Potencial de fissuração

A Figura 26 retrata, genericamente, o desenvolvimento da deformação do anel de aço ao longo do tempo no ensaio de retração por secagem restringida.

Figura 26: Exemplo genérico do desenvolvimento da curva deformação do aço no ensaio de retração por secagem restringida



Fonte: Adaptado de ASTM C1581/C1581M (2018).

A análise gráfica permite aferir os seguintes parâmetros:

- I. Deformação inicial – deformação correspondente ao início do processo de secagem;
- II. Idade de fissuração, cujo valor é evidenciado pela brusca queda na deformação (alívio de tensão);
- III. Deformação máxima – deformação usualmente precedida do ponto de fissuração, a qual está relacionada com a magnitude de tensão desenvolvida no material sob as condições de restrição providas pelo ensaio.

O potencial de fissuração do compósito é caracterizado conforme as faixas de classificação apresentada na Tabela 13, a qual está associada com a taxa de tensão (calculado conforme a Equação 2) e o *Net time-to-cracking* (diferença entre a idade de fissuração e a idade do início do processo de secagem). Nota-se que o aumento da taxa de tensão resulta em um maior potencial de fissuração.

Tabela 13: Classificação do potencial de fissuração

<i>Net time-to-cracking</i> , t_{cr} [d]	Taxa de tensão [MPa/d]	Potencial de fissuração
$0 < t_{cr} \leq 7$	$S \geq 0,34$	Alto
$7 < t_{cr} \leq 14$	$0,17 \leq S < 0,34$	Moderado-alto
$14 < t_{cr} \leq 28$	$0,10 \leq S < 0,17$	Moderado-baixo
$t_{cr} > 28$	$S < 0,10$	Baixo

Fonte: See, Attiogbe e Miltenberger (2004).

$$q = \frac{G \cdot |\alpha|}{2 \cdot \sqrt{t_r}} \quad \text{Equação 2}$$

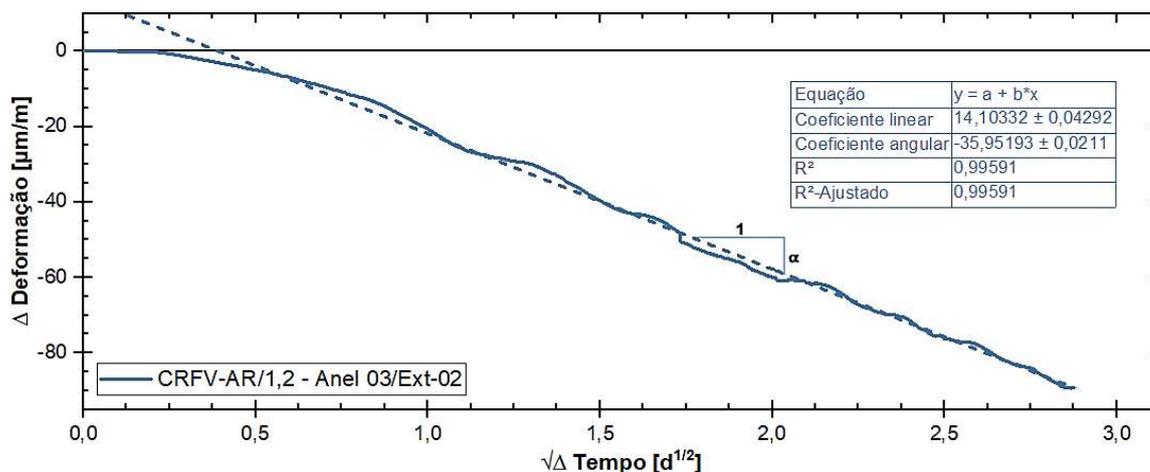
Onde,

q é a taxa de tensão [MPa/dia];

t_r a diferença entre a idade de fissuração e a idade em que se iniciou a secagem [d];

G uma constante igual a 72,2 [MPa] – valor provindo de See, Attiogbe e Miltenberger (2004);

α (fator da taxa de deformação), em $[(\mu\text{m}/\text{m})/\text{d}^{1/2}]$, se refere ao coeficiente angular da reta $\varepsilon_{net} = \alpha\sqrt{t} + k$, obtido por meio da análise de regressão linear da curva ‘ Δ Deformação versus $\sqrt{\Delta}$ Tempo’, conforme exemplificado no Gráfico 2. Salienta-se que o intervalo de análise está compreendido entre a idade de início do processo de secagem e a idade de fissuração. As retas obtidas pela regressão linear das amostras individuais são apresentadas no APÊNDICE B.

Gráfico 2: Regressão linear da curva ‘ Δ Deformação versus $\sqrt{\Delta}$ Tempo’

Fonte: Autoria própria.

Notas:

- (1) ‘ Δ Deformação’ corresponde ao termo ‘*Net strain*’ [$\mu\text{m}/\text{m}$]: Contabilizado a partir do início do processo de secagem, trata-se da diferença entre a deformação mensurada no anel de aço interno e a deformação inicial;
- (2) ‘ $\sqrt{\Delta}$ Tempo’ corresponde ao termo ‘*Elapsed time*’ [$\text{d}^{1/2}$]: Contabilizado a partir do início do processo de secagem, trata-se da diferença entre a idade de fissuração e a idade do início do processo de secagem.

4.3.5. Avaliação da fissuração

A ASTM C1579-21 (ASTM, 2021) lista algumas ferramentas pertinentes para mensurar a espessura da fissura como, por exemplo, microscópio óptico portátil, fissurômetro e sistemas de análise de imagem. A norma salienta que o equipamento de medição deve possuir uma precisão de $\pm 0,05$ mm.

Nesta dissertação, a inspeção da abertura de fissuras e a aferição de sua espessura foram realizadas com auxílio de um microscópio digital, conforme aparelho apresentado na Figura 27a.

Figura 27: (a) Microscópio digital portátil; (b) Régua de calibração



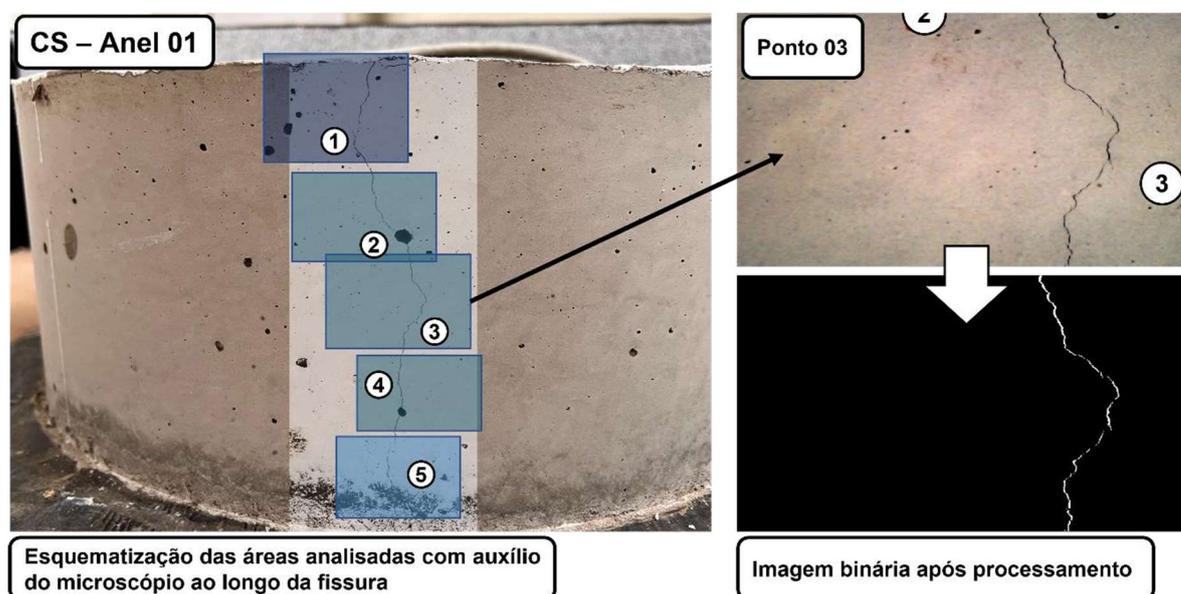
Fonte: Autoria própria.

A superfície da área fissurada foi dividida em seções para inspeção com o microscópio digital, conforme ilustrado na Figura 28 à esquerda.

Com a finalidade de destacar as fissuras, as imagens foram editadas em binárias e posteriormente sobrepostas às originais com uma transparência de 50%. A imagem binária das fissuras foi processada com auxílio do software ImageJ.

Cumpre salientar que os ruídos nas imagens foram apagados manualmente, delineando, portanto, apenas a área da fissura. A Figura 28 à direita esquematiza os procedimentos de análise das seções delimitadas na superfície do anel seguido da edição das imagens.

Figura 28: Metodologia aplicada para processar as imagens em binário

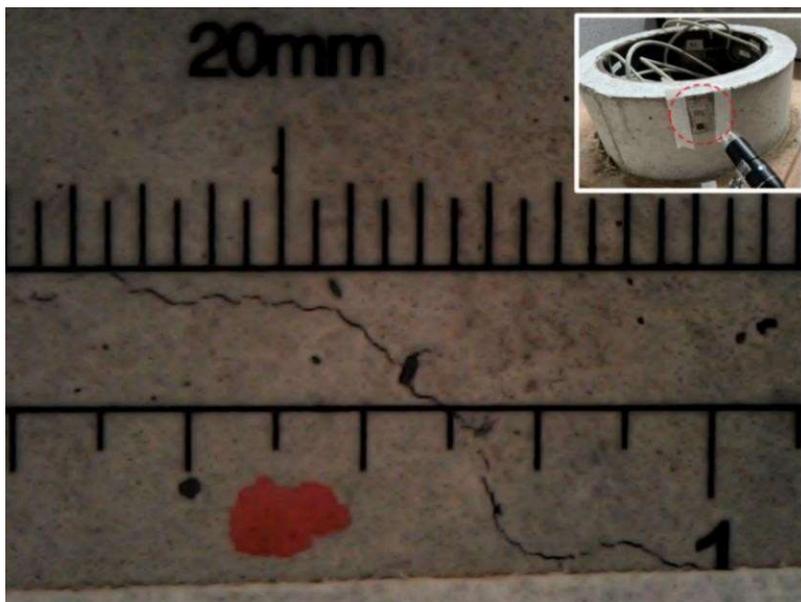


Fonte: Autoria própria.

Precedente a cada medição, um cartão transparente (indicado na Figura 27b) com marcas de largura especificadas foi posicionado próximo à superfície do anel com a finalidade de calibrar a escala da imagem capturada pelo microscópio (Figura 29).

Em seguida, registrou-se a abertura da fissura ao longo de sua extensão. Em adição, buscou-se verificar a ocorrência da propagação da fissura ao longo da seção radial do anel.

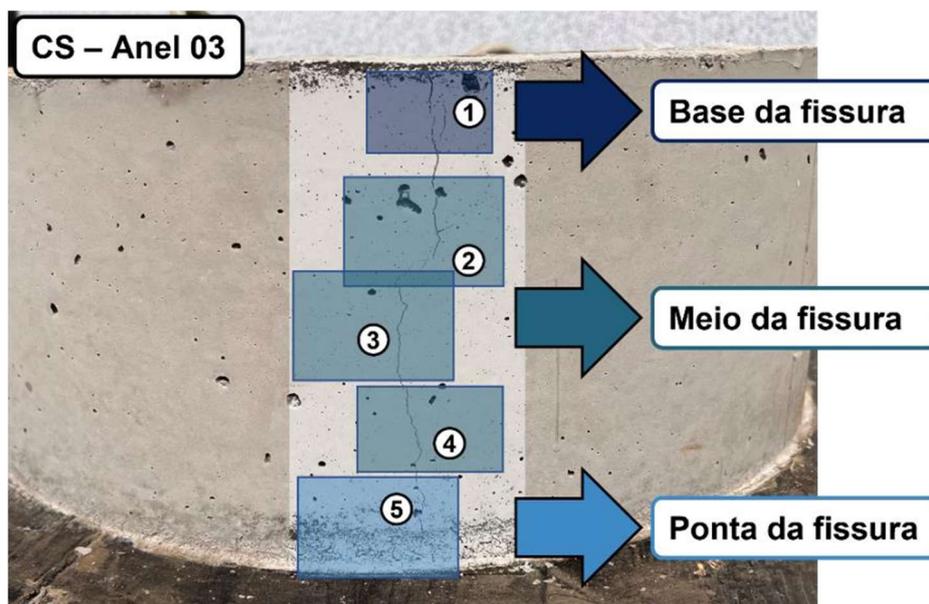
Figura 29: Procedimento de calibração para aferir a abertura de fissuras



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente, os pontos coletados foram organizados em subgrupos (base, meio e ponta da fissuração) para análise gráfica e estatística. A Figura 30 ilustra a organização das áreas de influência que limitam as fissuras nos subgrupos.

Figura 30: Ilustração na metodologia de análise da fissuração



Fonte: Autoria própria.

5. RESULTADOS OBTIDOS

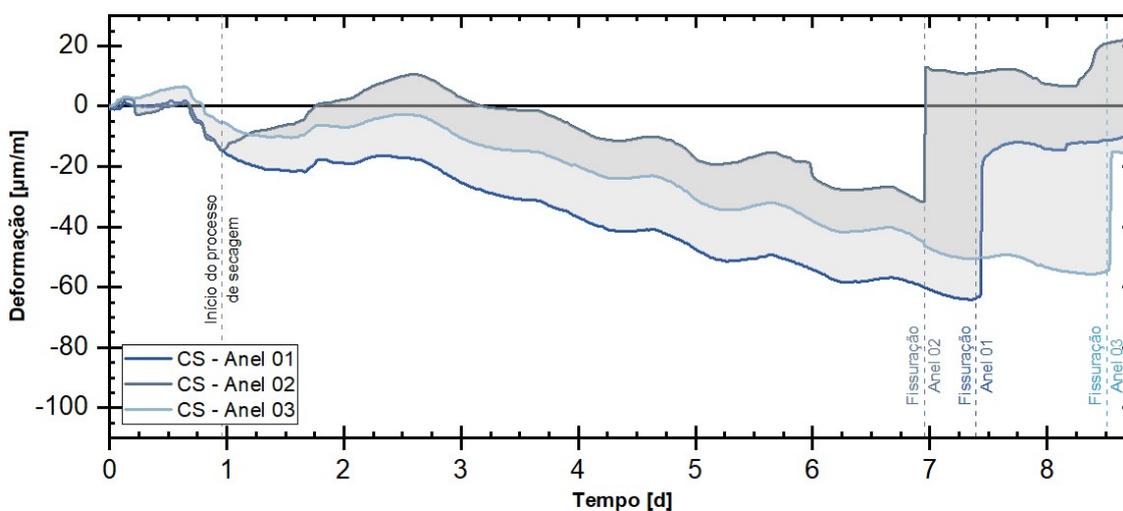
5.1. Ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido

O presente capítulo retrata os resultados obtidos para as distintas dosagens no ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido. O ensaio preconizado pela ASTM C1581/C1581M (2018) foi conduzido com o intuito de verificar o desempenho de dosagens contendo microfibras de poliamida e vidro álcali-resistente, nas dosagens de $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$ e $1,2 \text{ kg/m}^3$, para o controle da fissuração devido à retração por secagem quando comparadas com a amostra referência.

5.1.1. Análise das curvas Deformação *versus* Tempo

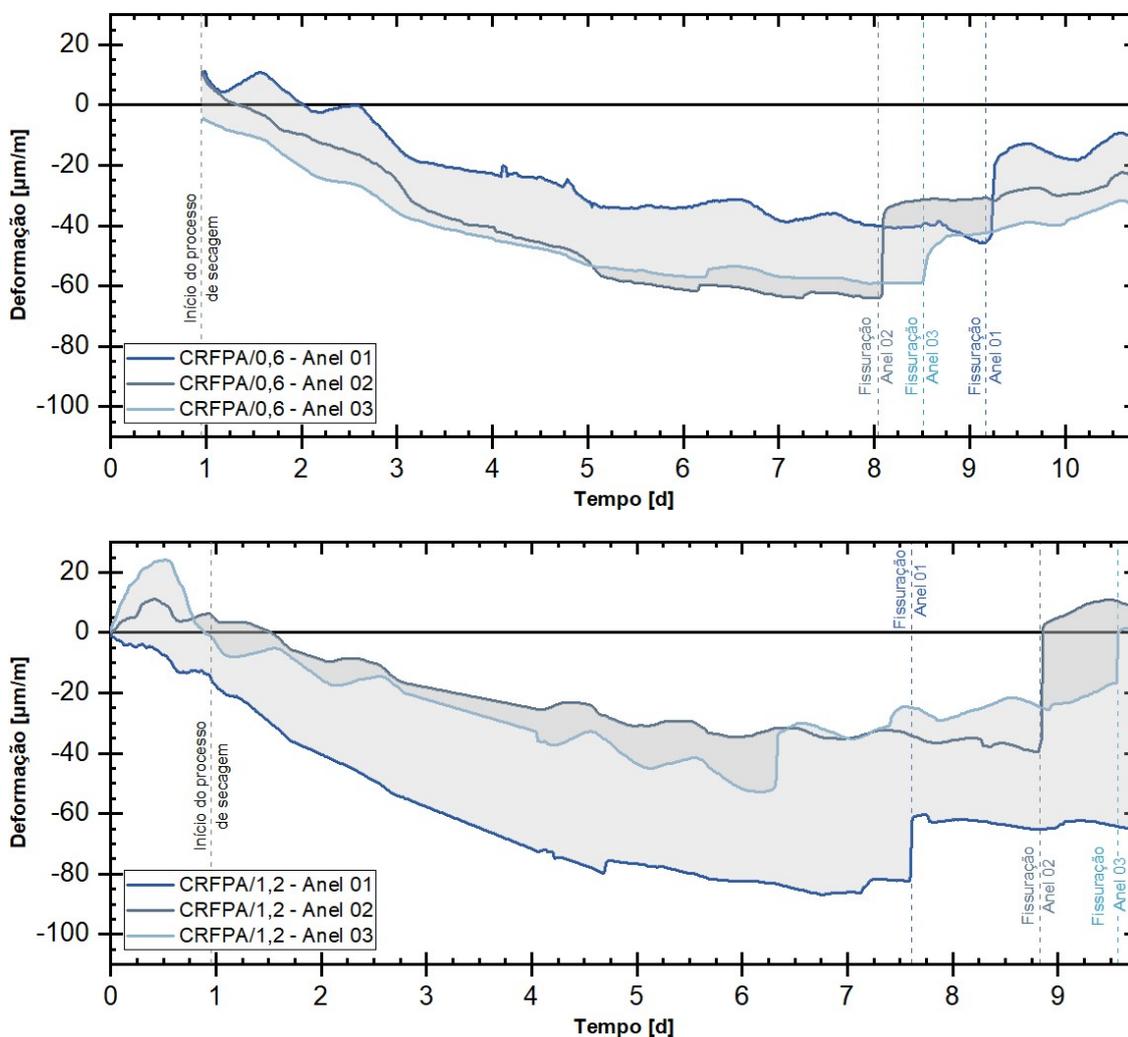
O desenvolvimento da deformação nos anéis de aço interno ao longo do tempo é apresentado nos Gráfico 3 a 5 para as amostras de concreto simples (CS), concreto reforçado com microfibras de poliamida (CRFPA) e concreto reforçado com microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR). As curvas plotadas representam a média das curvas individuais (ver APÊNDICE B) identificadas nos anéis de aço. O registro do ambiente teste durante ensaio, para as respectivas dosagens, está indicado no APÊNDICE C.

Gráfico 3: Curvas 'Deformação *versus* Tempo' para o Concreto Simples (CS)



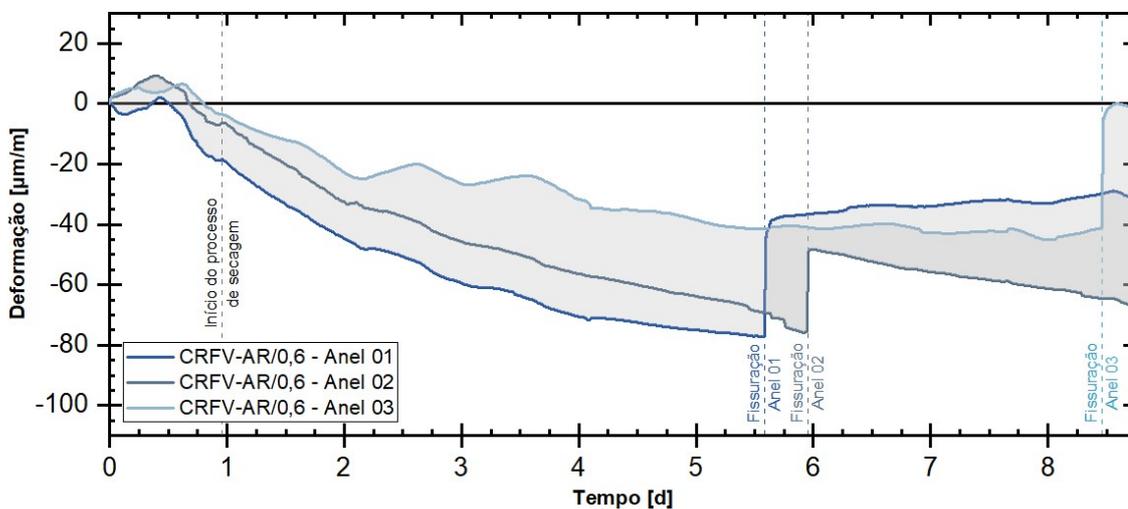
Fonte: Autoria própria.

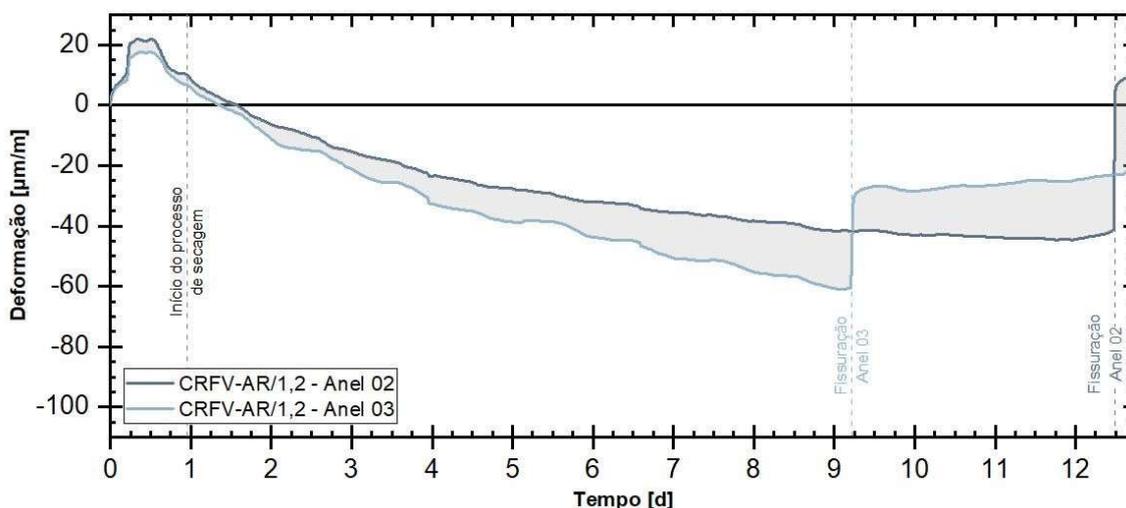
Gráfico 4: Curvas ‘Deformação versus Tempo’ para o concreto reforçado com microfibras de poliamida (CRFPA), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 5: Curvas ‘Deformação versus Tempo’ para o concreto reforçado com microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$





Fonte: Autoria própria.

Nas primeiras 24 h, observa-se uma ação expansiva, que segundo Ehrenbring *et al.* (2019), trata da dilatação térmica do anel de aço em função da hidratação dos grãos de cimento.

O início do processo de secagem, somado à restrição passiva provida pelo anel de aço interno, promove o desenvolvimento de tensões de tração no compósito.

Quando a tensão de tração induzida excede à resistência do material, origina a formação de fissuras. Neste ensaio, o decréscimo repentino na deformação do anel de aço interno indica o ponto da fissuração (ACI PRC 544.11, 2022).

A priori, o desenvolvimento da deformação nas matrizes avaliadas exhibe um regime semelhante. Sequencialmente, discute-se o comportamento individual das curvas e entre os grupos (dosagens).

Nota-se que todas as dosagens apresentaram uma queda brusca na deformação no ponto de fissuração, assemelhando-se com trabalhos desenvolvidos por Briffaut, Benboudjema e D'Aloia (2016), Saradar *et al.* (2018) e Borges, Motta e Silva (2020). Por outro lado, K. Choi, H. Choi e Kim (2015), Yousefieh *et al.* (2017) e Ehrenbring (2019) apontam um decréscimo gradual após a formação da primeira fissura para as amostras reforçadas com microfibras.

As curvas de deformação das amostras de concreto simples (vide Gráfico 3) indicam que a fissuração dos compósitos ocorreu entre as idades de 7,00 e 8,50 dias. Conforme discutido no APÊNDICE B, diferentemente das demais dosagens, o concreto simples apresentou uma expansão após o início do processo

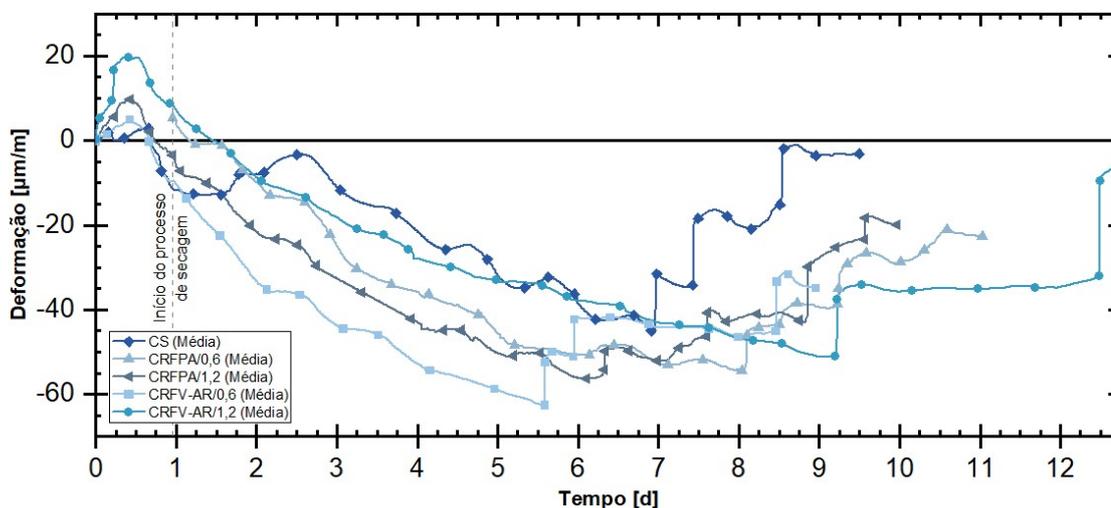
de secagem, as quais foram decorrentes da interferência do ambiente teste. Apesar do sistema adotado para estabilizar a temperatura, entre o segundo e terceiro dia de cura, houve uma queda brusca.

O registro da deformação para as dosagens contendo adição de microfibras resultaram em valores máximos compreendidos entre 40 – 80 $\mu\text{m}/\text{m}$. Verifica-se que a idade de fissuração das amostras em CRFV-AR/0,6 preponderantemente se antepuseram à amostra referência. Todavia, o incremento na dosagem das microfibras postergou o ponto de fissuração para um intervalo entre 9,00 – 12,50 dias.

Por sua vez, o concreto reforçado com microfibras de poliamida, em ambas as dosagens, não adiou a idade de fissuração do compósito em relação à amostra referência, fissurando no mesmo intervalo de tempo (8,00 – 9,25 dias).

A análise das curvas médias de 'Deformação *versus* Tempo' das dosagens de concreto (vide Gráfico 6) possibilita identificar o aumento na intensidade de deformação para as amostras reforçadas com microfibras, quando comparadas com a amostra referência. Em complemento, o CRF apresentou preponderantemente alívios de tensão em idades posteriores ao CS.

Gráfico 6: Curvas médias 'Deformação *versus* Tempo'



Fonte: Autoria própria.

5.1.2. Análise da ‘Deformação máxima’ e ‘Idade de fissuração’

A Tabela 14 indica os parâmetros coletados das curvas de desenvolvimento da deformação do anel de aço, sendo:

- I. Deformação inicial (valor correspondente à idade cujo processo de secagem foi iniciado);
- II. Deformação máxima (valor antecedente à fissuração do compósito);
- III. Idade de fissuração.

Ainda que previamente verificados, constatou-se níveis de deformação exorbitantes para determinados extensômetros ($\approx 10.000 \mu\text{m/m}$) durante o experimento, cujos valores não correspondem com àqueles apresentados na literatura (faixa entre 40 – 120 $\mu\text{m/m}$). Desta maneira, eles foram desconsiderados da análise do presente estudo.

Em adição, a resistência à compressão e à tração, na idade da fissuração, são indicados na Tabela 14. A resistência à tração uniaxial média foi estimada, com base nos resultados de resistência à tração por flexão, conforme a Equação 3 – cálculo apresentado pela *Fédération Internationale du Béton (fib) Model Code for Concrete Structures 2010* (2013).

$$f_{ctm} = \alpha_{fl} \cdot f_{ctm,fl} \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

$f_{ctm,fl}$: Resistência à tração por flexão média [MPa];

$$\alpha_{fl} = \frac{(0,06 \cdot h_b^{0,7})}{(1 + 0,06 \cdot h_b^{0,7})}$$

h_b : Altura do corpo de prova [mm].

Verifica-se que a fissuração nos anéis ocorreram devido às tensões internas de tração média compreendidas entre [4,8 ; 5,4] MPa. Nota-se que o nível de tensão de tração não difere significativamente entre a amostra referência e àquelas reforçadas com microfibras.

Tabela 14: Resultados inerentes às curvas de ‘Deformação versus Tempo’ do ensaio de retração restringida para cada compósito

Amostra	Deformação inicial [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Deformação máxima [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Idade de fissuração [d]	f_{cm} [MPa]	f_{ctm} [MPa]
CS					
Anel 01/Ext-02	-14,74	-63,96	7,50	45,730	4,816
Anel 02/Ext-02	-15,06	-32,52	7,00		
Anel 03/Ext-01	-11,19	-77,86	8,50		
Anel 03/Ext-02	-1,02	-31,05	8,50		
CRFPA/0,6					
Anel 01/Ext-02	10,40	-45,65	9,25	48,811	5,369
Anel 02/Ext-01	3,85	-77,52	8,00		
Anel 02/Ext-02	18,10	-50,17	8,00		
Anel 03/Ext-01	-5,01	-58,55	8,50		
CRFV-AR/0,6					
Anel 01/Ext-01	-31,89	-110,22	5,50	40,085	5,191
Anel 01/Ext-02	-5,26	-43,70	5,50		
Anel 02/Ext-01	-14,54	-97,80	6,00		
Anel 02/Ext-02	1,35	-53,58	6,00		
Anel 03/Ext-01	3,82	-46,96	8,50		
Anel 03/Ext-02	-10,79	-35,29	8,50		
CRFPA/1,2					
Anel 01/Ext-01	-16,85	-104,46	7,50	47,148	5,393
Anel 01/Ext-02	-13,34	-60,31	7,50		
Anel 02/Ext-01	6,04	-39,74	8,75		
Anel 03/Ext-01	-1,06	-51,77	6,25		
CRFV-AR/1,2					
Anel 02/Ext-01	0,95	-29,25	12,50	49,333	5,352
Anel 02/Ext-02	8,57	-51,06	12,50		
Anel 03/Ext-01	13,13	-32,01	9,25		
Anel 03/Ext-02	0,11	-89,29	9,25		

Fonte: Autoria própria.

Neste estudo a deformação máxima e a idade de fissuração foram consideradas variáveis dependentes e analisadas individualmente. Admitindo as dosagens como variáveis independentes, aplicou-se a ‘análise de variância’ (ANOVA, *one-way*) com o intuito de verificar se há diferenças significativas entre os concretos. Em complemento, a idade de fissuração e a deformação máxima para os grupos de concreto são ilustradas no modelo *boxplot*.

Tabela 15: Análise de variância (ANOVA) aplicado nas variáveis dependentes do ensaio de retração por secagem restringida

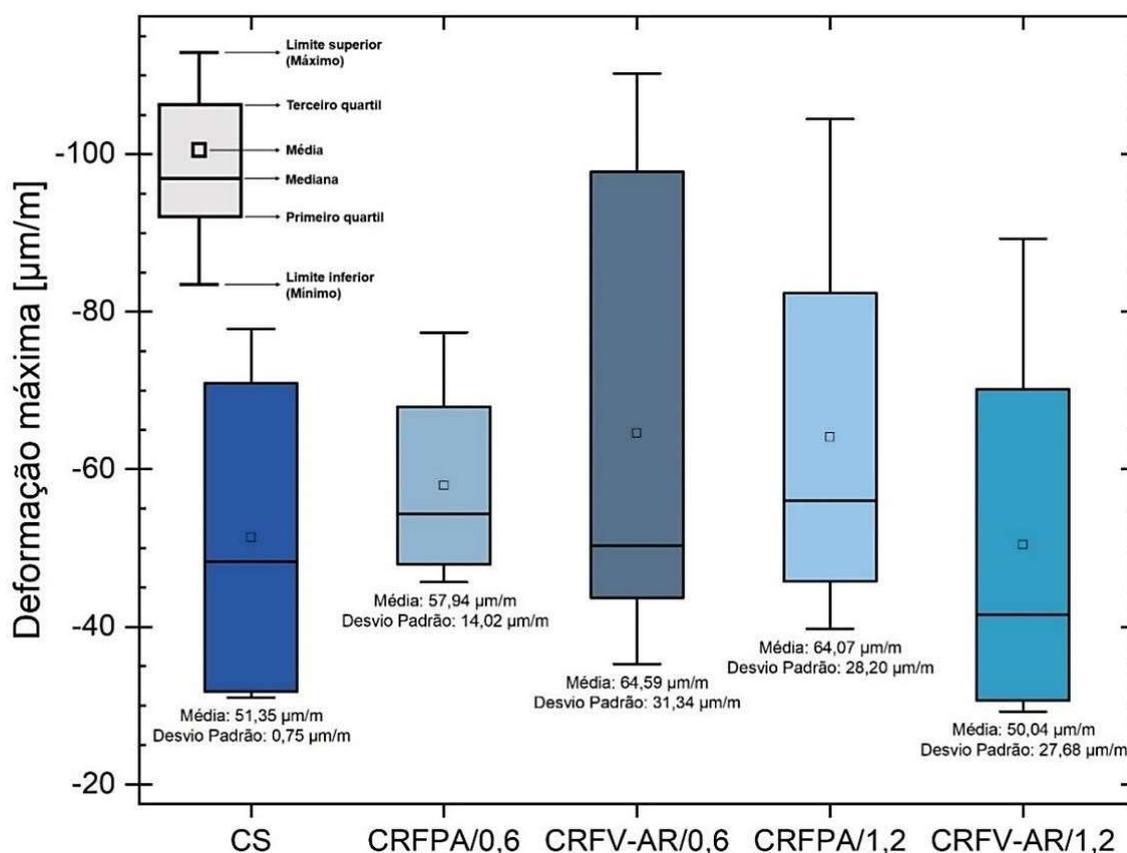
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Deformação máxima						
Entre grupos	814,031	4	203,508	0,293	8,79E-01	2,965
Dentro dos grupos	11817,574	17	695,151			
Idade de fissuração						
Entre grupos	45,214	4	11,303	7,182	1,41E-03	2,965
Dentro dos grupos	26,755	17	1,574			

Fonte: Autoria própria.

Com ênfase na deformação máxima, a análise ANOVA indicou que as médias da população não são diferentes para um nível de significância de 5% – resultados resumidos na Tabela 15.

Corroborando com esse resultado, constata-se no Gráfico 7 que a magnitude média das deformações máximas permaneceram em um intervalo entre 50 e 65 $\mu\text{m/m}$ para todas as dosagens.

Gráfico 7: Análise *boxplot* da deformação máxima nas dosagens



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que o conjunto de dados dos grupos apresentaram um comportamento assimétrico com desvio positivo denotando, portanto, uma concentração de dados abaixo de 55 $\mu\text{m/m}$, apesar da elevada amplitude. Embora os grupos apresentem uma proximidade nas médias e medianas, determinadas amostras das dosagens 'CRFPA/1,2', 'CRFV-AR/0,6' e 'CRFV-AR/1,2' exibiram deformações máximas compreendidas entre 90 e 110 $\mu\text{m/m}$.

Trabalhos presentes na literatura contemplam ambas as tendências de resultados. Passuello, Moriconi e Shah (2009), Saradar *et al.* (2018) e Borges, Motta e Pinto (2019) obtiveram deformações máximas, nos compósitos reforçados com microfibras, próximas à matriz referência. Em contradição, os estudos

conduzidos por Yousefieh *et al.* (2017) e Ehrenbring (2017) apontam maiores deformações nos compósitos reforçados com microfibras.

Por sua vez, o teste ANOVA indicou que as médias dos grupos, com base na 'Idade de fissuração', apresentam diferenças significativas para um nível de significância de 5%. Uma análise *post-hoc* aplicando o teste LSD de Fisher foi conduzido com o intuito de discutir a significância entre pares de médias dos concretos. Os resultados obtidos são compilados na Tabela 16.

O teste LSD de Fisher indica que as médias da idade de fissuração dos concretos reforçados com microfibras não são significativamente diferentes da amostra referência (CS), salvo a dosagem 'CRFV-AR/1,2'.

Tabela 16: Resultados do Teste LSD de Fisher – verificação da variável 'Idade de fissuração'

Combinação	Diferença entre as médias	valor-t	valor-P	Significância
Idade de fissuração				
CRFPA/0,6 + CS	0,563	0,634	0,534	0
CRFV-AR/0,6 + CS	-1,208	-1,492	0,154	0
CRFPA/1,2 + CS	-0,375	-0,423	0,678	0
CRFV-AR/1,2 + CS	3,000	3,382	0,004	1
CRFPA/0,6 + CRFPA/1,2	-0,938	-1,057	0,305	0
CRFV-AR/0,6 + CRFV-AR/1,2	4,208	5,197	0,000	1
CRFV-AR/0,6 + CRFPA/0,6	-1,771	-2,187	0,043	1
CRFV-AR/1,2 + CRFPA/0,6	2,438	2,748	0,014	1
CRFV-AR/1,2 + CRFPA/1,2	3,375	3,805	0,001	1
CRFPA/1,2 + CRFV-AR/0,6	0,833	1,029	0,318	0

Fonte: Autoria própria.

Notas:

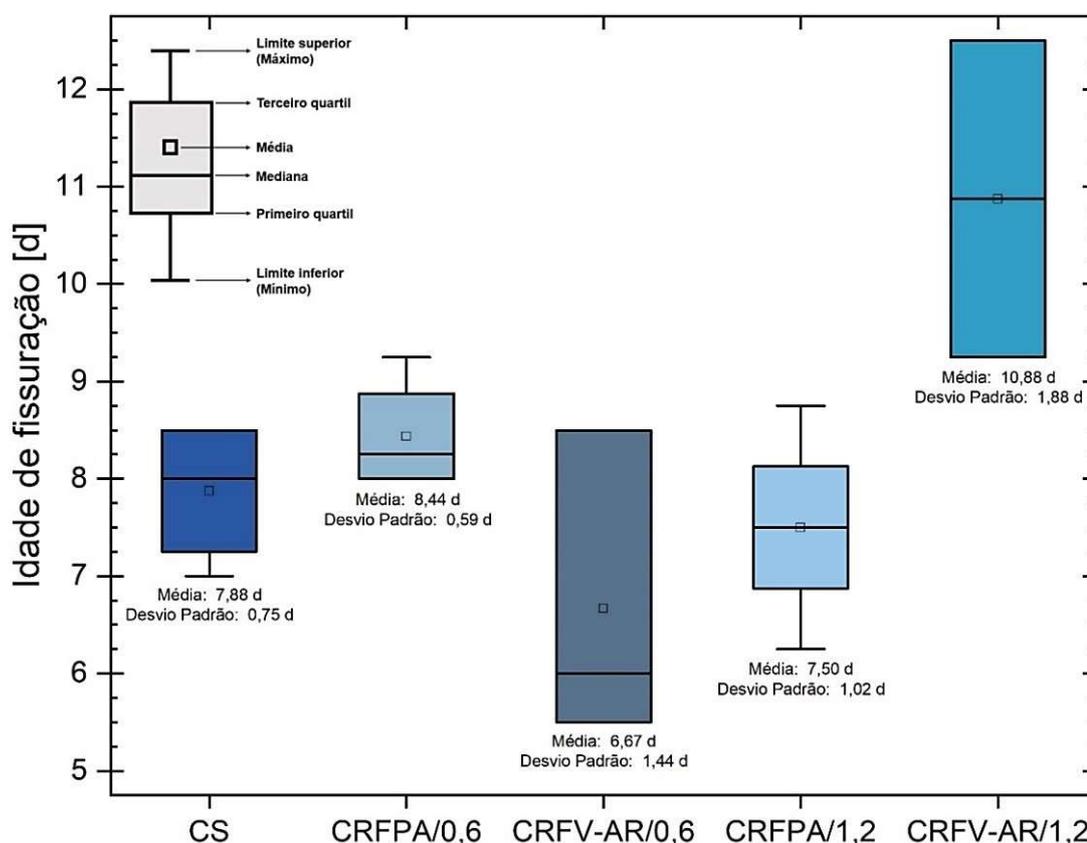
(0) Significância igual a 0 indica que a diferença entre as médias não é significativa para $\alpha=0,05$;

(1) Significância igual a 1 indica que a diferença entre as médias é significativa para $\alpha=0,05$.

Conforme o Gráfico 8, a mediana da dosagem do concreto referência se aproxima com àqueles contendo adição de microfibras de poliamida.

As dosagens com adição de microfibras de vidro álcali-resistente apresentaram um elevado intervalo interquartilico para a idade de fissuração. O incremento na dosagem resultou em mudanças significativas, como observado pela comparação entre 'CRFV-AR/0,6 + CRFV-AR/1,2'. A dosagem CRFV-AR/1,2 apresentou menores deformações e prorrogou a idade de fissuração.

Por outro lado, tendências opostas foram obtidas para as dosagens com microfibras de poliamida, na qual o aumento na dosagem das microfibras não resultou em um desvio significativo entre as médias.

Gráfico 8: Análise *boxplot* da idade de fissuração nas dosagens

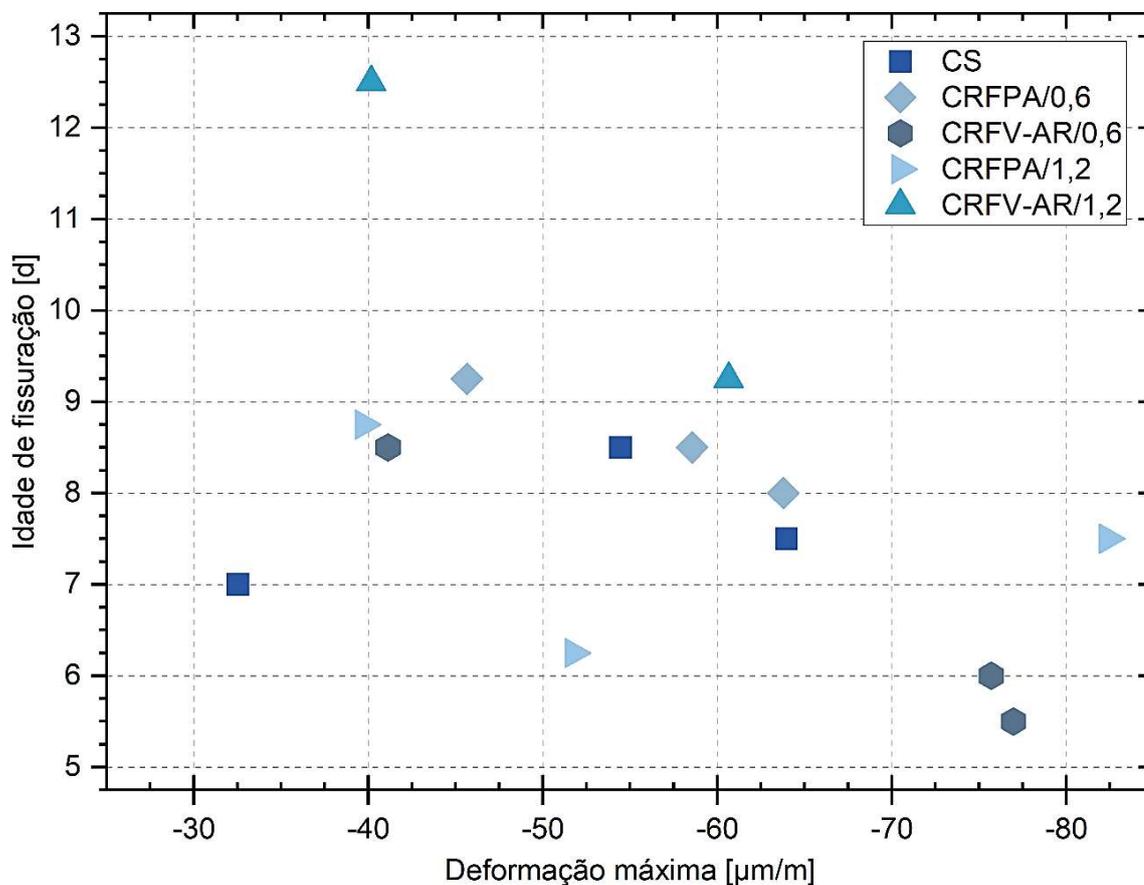
Fonte: Autoria própria.

Devido a semelhança na intensidade da deformação máxima dos anéis de aço entre o concreto referência e reforçado com fibras, espera-se que idade de fissuração seja equivalente entre as amostras (PASSUELLO; MORICONI; SHAH, 2009). Acredita-se que essa afirmação é válida pressupondo que as amostras advêm da mesma população, apresentando, por conseguinte, propriedades mecânicas similares / próximas.

Com base neste argumento, o Gráfico 9 compara a 'Idade de fissuração' pela 'Deformação máxima'. As amostras cujas deformações máximas se concentraram no intervalo entre 40 e 60 $\mu\text{m}/\text{m}$ resultaram no ponto de fissuração em idades próximas a [7; 9] dias.

Em complemento, buscou-se determinar o coeficiente de correlação de Pearson com a finalidade de investigar o grau e direção da associação entre a 'Deformação máxima' e a 'Idade de fissuração'. Neste caso, obteve-se $r_{x,y} = 0,39559$, indicando uma correlação negativa fraca.

Gráfico 9: Análise das amostras conforme as variáveis 'Idade de fissuração' e 'Deformação máxima'



Fonte: Autoria própria.

Notas:

(1) Nesta análise, adotou-se a média do grupo de extensômetros em cada amostra.

Nota-se no APÊNDICE B que determinadas amostras apresentaram uma alta amplitude de deformação entre grupos de extensômetros do mesmo anel. Evidencia-se, portanto, a sensibilidade da aquisição de dados e a indispensabilidade de despender esforço na etapa de extensometria.

Neste caso, especula-se que a análise do ponto de fissuração seja mais bem representada pela deformação de maior magnitude. Por exemplo, na amostra 'CRFV-AR/0,6 – Anel 01', o extensômetro 01 (Ext-01) indicou uma deformação de $-110,22 \mu\text{m/m}$. Ainda que o extensômetro diametralmente oposto (Ext-02) tenha indicado uma menor deformação ($-43,70 \mu\text{m/m}$), acredita-se que o ponto de fissuração tenha sido governado pela deformação mensurada pelo Ext-01. Comportamento análogo foi observado para as amostras CRFV-AR/0,6 – Anel 02' e CRFPA/1,2 – Anel 01'.

5.1.3. Análise do potencial de fissuração

A Tabela 17 indica os resultados provenientes dos cálculos discurridos no item 4.3.4 (página 68). A determinação do fator da taxa de deformação (*strain rate factor*) – coeficiente angular obtido por meio da análise de regressão linear da curva ‘ Δ Deformação versus $\sqrt{\Delta}$ Tempo’, é indica no APÊNDICE B para as amostras avaliadas.

Sequencialmente, o potencial de fissuração das amostras foi classificado conforme os critérios descritos na Tabela 13 (página 69). Cumpre salientar que a classificação mais desfavorável foi considerada.

Tabela 17: Potencial de fissuração das dosagens no ensaio de retração restringida

Amostra	t_{cr} [d]	a [($\mu\text{m}/\text{m}$)/$d^{1/2}$]	q [MPa/d]	Potencial de fissuração
CS				
Anel 01/Ext-02	6,44	-24,77	0,35	Alto
Anel 02/Ext-02	6,00	-32,83	0,48	Alto
Anel 03/Ext-01	7,56	-30,08	0,39	Alto
Anel 03/Ext-02	7,57	-36,11	0,47	Moderado-alto
CRFPA/0,6				
Anel 01/Ext-02	8,21	-23,53	0,30	Moderado-alto
Anel 02/Ext-01	7,09	-32,58	0,44	Alto
Anel 02/Ext-02	7,11	-37,51	0,51	Alto
Anel 03/Ext-01	7,56	-24,64	0,32	Moderado-alto
CRFV-AR/0,6				
Anel 01/Ext-01	4,63	-43,82	0,74	Alto
Anel 01/Ext-02	4,63	-20,98	0,35	Alto
Anel 02/Ext-01	4,97	-40,67	0,66	Alto
Anel 02/Ext-02	4,99	-27,05	0,44	Alto
Anel 03/Ext-01	7,50	-23,68	0,31	Moderado-alto
Anel 03/Ext-02	7,50	-9,35	0,12	Moderado-alto
CRFPA/1,2				
Anel 01/Ext-01	6,64	-36,11	0,51	Alto
Anel 01/Ext-02	6,64	-28,26	0,40	Alto
Anel 02/Ext-01	7,86	-18,24	0,23	Moderado-alto
Anel 03/Ext-01	5,34	-25,35	0,40	Alto
CRFV-AR/1,2				
Anel 02/Ext-01	11,53	-10,54	0,11	Moderado-alto
Anel 02/Ext-02	11,53	-24,38	0,26	Moderado-alto
Anel 03/Ext-01	8,253	-17,73	0,22	Moderado-alto
Anel 03/Ext-02	8,27	-35,95	0,45	Alto

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que as amostras atingiram, preponderantemente, um potencial alto de fissuração. As acentuadas deformações máximas somadas à fissuração precoce [em determinadas amostras] proporcionaram taxas de tensão elevadas e, conseqüentemente, a classificação do compósito como alto potencial de fissuração.

Apesar do 'CRFV-AR/1,2' ter resultado em taxas de tensão inferiores às demais dosagens, a classificação do compósito ficou limitada ao potencial moderado-alto em função do *Net time-to-cracking*, cujo valor se encontra inferior a 14 dias.

Com base no evidenciado, constata-se que a adição de microfibras de poliamida e vidro álcali-resistente não implicaram significativamente na mudança do potencial de fissuração.

5.1.4. Análise do padrão de fissuração

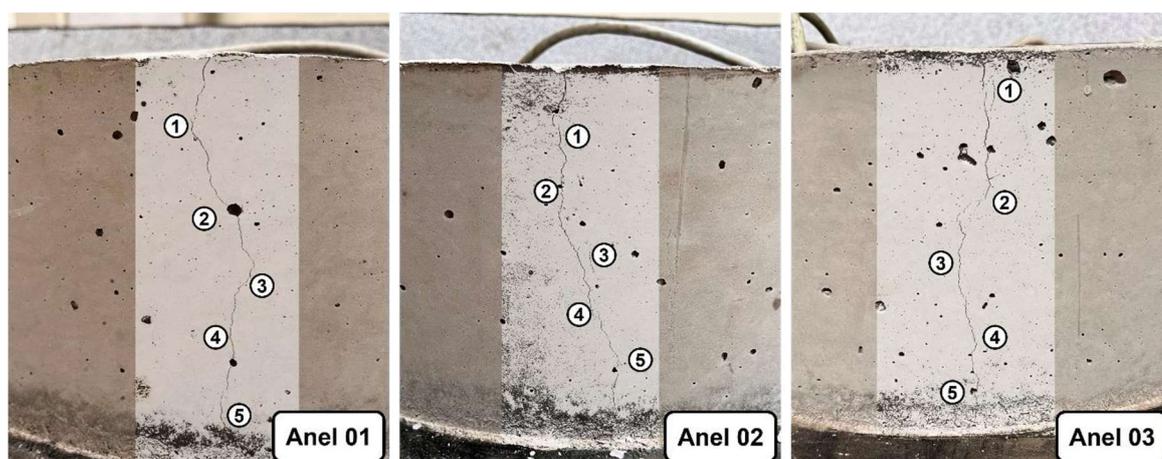
O início do processo de secagem promove a formação de microfissuras em pontos vulneráveis na matriz cimentícia, desenvolvendo-se posteriormente em microfissuras e se tornando visíveis (KIM; WEISS, 2003; KWON *et al.*, 2007).

No ensaio de retração por secagem restringida, a retração não-uniforme, oriunda do gradiente de umidade, promove tensões de tração na superfície do anel paralelas à superfície de secagem resultando, conseqüentemente, em fissuras perpendiculares à face (BISSCHOP, 2003).

O padrão de fissuração das amostras avaliadas é ilustrado nas Figura 31 a 33. As fissuras ocorreram na superfície externa do anel de concreto, sendo a sua origem decorrente da retração por secagem.

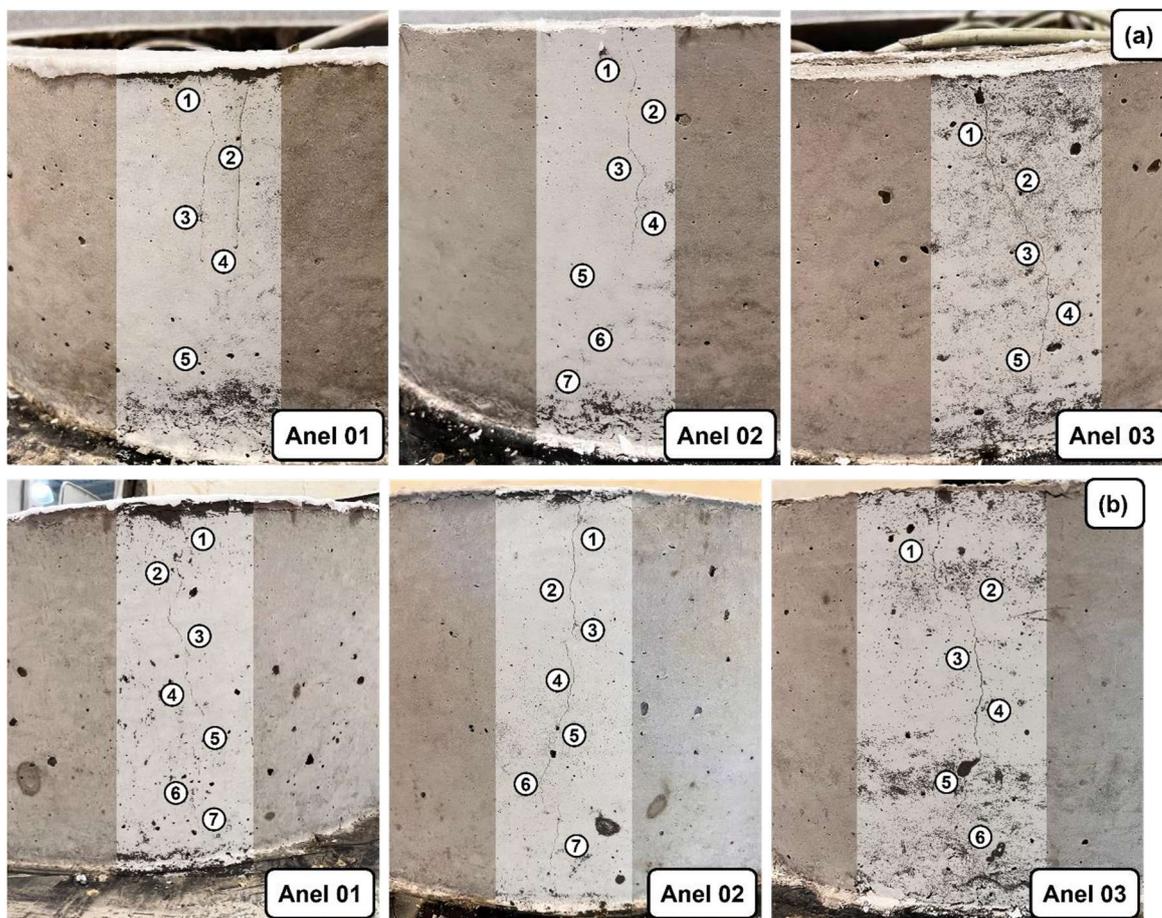
Em função das dimensões da fissura ao longo de sua extensão, acredita-se que elas tiveram início no topo do anel (próxima a superfície selada com parafina) e propagaram na direção vertical até a base do anel.

Figura 31: Registro da fissuração nas amostras de concreto simples (CS)



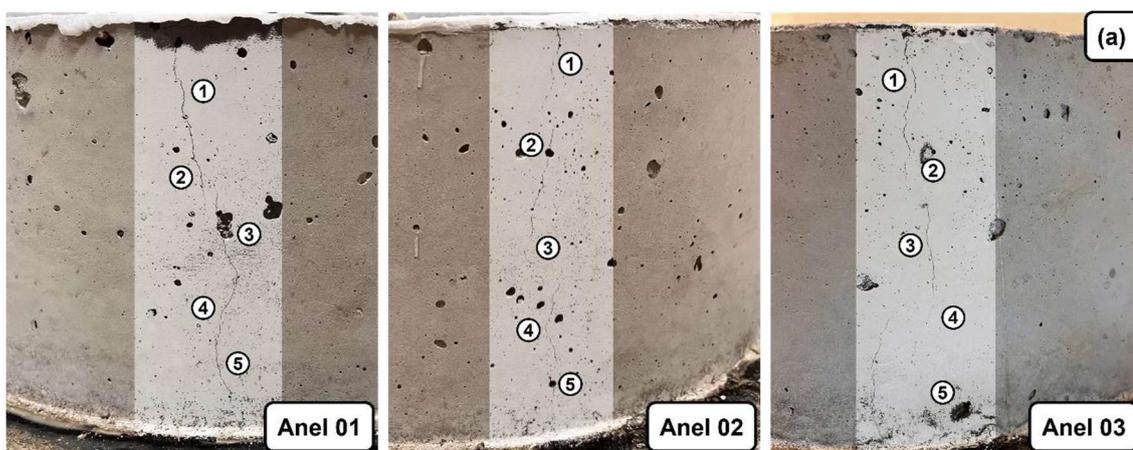
Fonte: Autoria própria.

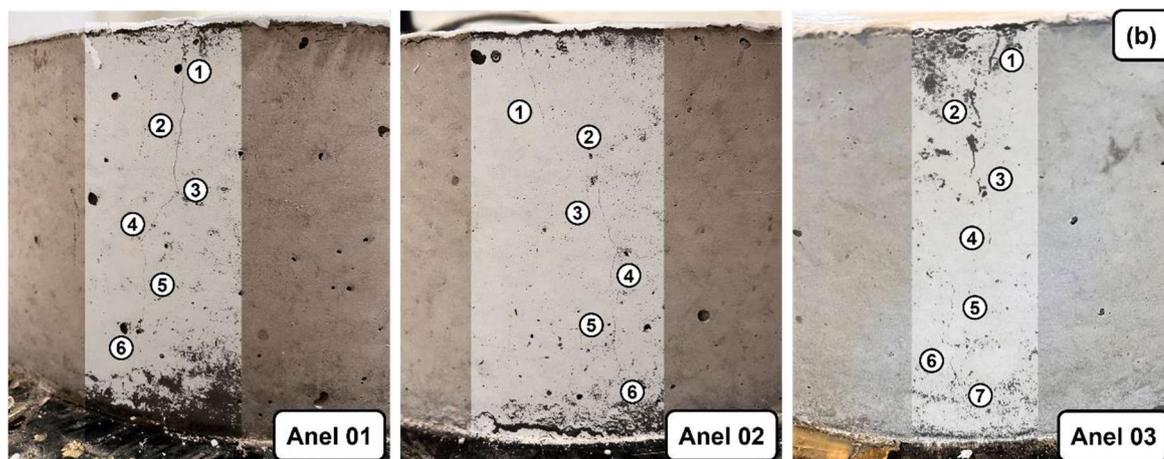
Figura 32: Registro da fissuração nas amostras de concreto reforçado com microfibras de poliamida (CRFPA), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$



Fonte: Autoria própria.

Figura 33: Registro da fissuração nas amostras de concreto reforçado com microfibras de vidro álcali-resistente (CRFV-AR), sendo: (a) $V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$; e (b) $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$





Fonte: Autoria própria.

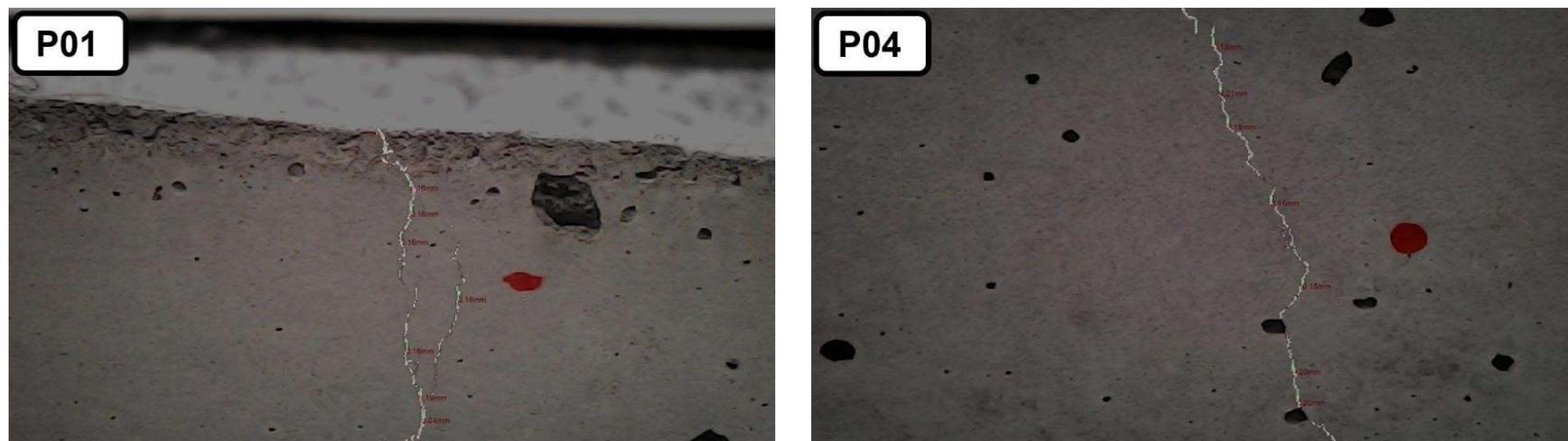
Neste estudo, a adição de microfibras proporcionou, como esperado, uma redução significativa na abertura das fissuras. As amostras em concreto reforçado com microfibras apresentaram aberturas de fissura visivelmente inferiores ao concreto referência. Embora a dimensão das fissuras no topo do anel tenha apresentado espessura próximas à referência, ela foi atenuada ao longo de sua extensão. Em adição, nota-se descontinuidades ao longo de seu desenvolvimento.

O desenvolvimento da fissura é retido devido a presença das fibras, as quais atuam como pontes de transmissão de tensões (KIM; WEISS, 2003; LAWLER *et al.*, 2003). A presença de microfibras atenua à amplificação das fissuras (LAWLER *et al.*, 2003), visto que a sua concentração proporciona uma maior área de contato no plano de fratura com a matriz cimentícia, possibilitando, portanto, a transferência dos esforços através das fissuras de maneira mais eficiente (MEHTA; MONTEIRO, 2013). Em adição, o aumento na dosagem das fibras torna dificultoso localizar a fissuração (KIM; WEISS, 2003).

Apesar da literatura apontar a possibilidade de múltiplas fissuras superficiais nos compósitos reforçados com fibras, apenas duas amostras manifestaram esse comportamento ('CRFV-AR/0,6 – Anel 01' e 'CRFV-AR/1,2 – Anel 02'). Ressalta-se que o registro fotográfico e a avaliação das fissuras ocorreram próximo à idade de término do ensaio.

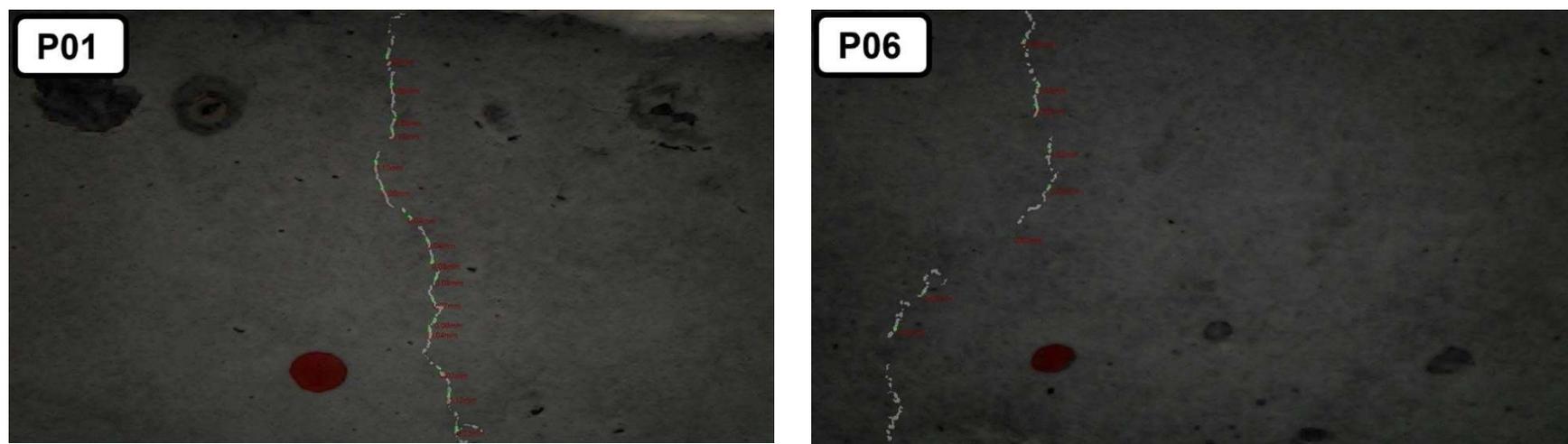
Segundo Kim e Weiss (2003), para que a fissura se desenvolva de maneira significativa, tornando-se visível, requer tempo adicional de secagem. Portanto, acredita-se que as demais fissuras não tenham se desenvolvido a ponto de serem perceptíveis sem o uso de instrumentos digitais.

Figura 34: Comparação da fissura na amostra CS – Anel 03 (pontos P01 e P04)



Fonte: Autoria própria.

Figura 35: Comparação da fissura na amostra CRFV-AR/1,2 – Anel 02 (pontos P01 e P06)



Fonte: Autoria própria.

Após localizadas na superfície do anel, a largura das fissuras, em cada exemplar, foi aferida com auxílio de um microscópio digital conforme a metodologia descrita no item 4.3.5 (página 70). Os pontos aferidos ao longo da extensão de cada amostra são indicados Figura 31 a 33. A abertura média registrada na base, meio de ponta é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18: Abertura média das fissuras nos pontos indicados

Amostra	Base [mm] (Pontos)¹	Meio [mm] (Pontos)¹	Ponta [mm] (Pontos)¹	Radial [mm]
CS				
Anel 01	0,15 (P1)	0,14 (P2-P4)	0,13 (P5)	Completa
Anel 02	0,13 (P1-P2)	0,13 (P3-P4)	0,13 (P5)	Completa
Anel 03	0,18 (P1)	0,18 (P2-P4)	0,15 (P5)	Não identificada
CRFPA/0,6				
Anel 01	0,10 (P1)	0,09 (P2-P4)	0,07 (P5)	Não identificada
Anel 02	0,09 (P1-P3)	0,08 (P4-P6)	0,08 (P7)	Parcial
Anel 03	0,10 (P1-P2)	0,09 (P3-P4)	0,05 (P5)	Parcial
CRFPA/1,2				
Anel 01	0,10 (P1-P2)	0,07 (P3-P4)	0,06 (P5-P7)	Completa
Anel 02	0,08 (P1-P3)	0,07 (P4-P6)	0,07 (P7)	Não identificada
Anel 03	0,09 (P1-P2)	0,08 (P3-P4)	0,07 (P5-P6)	Não identificada
CRFV-AR/0,6				
Anel 01	0,13 (P1)	0,10 (P2-P4)	0,10 (P5)	Completa
Anel 02	0,12 (P1)	0,10 (P2-P4)	0,07 (P5)	Parcial
Anel 03	0,11 (P1)	0,07 (P2-P3)	0,05 (P4-P5)	Não identificada
CRFV-AR/1,2				
Anel 01	0,07 (P1-P2)	0,05 (P3-P5)	0,05 (P6)	Não identificada
Anel 02	0,07 (P1)	0,03 (P2-P4)	0,04 (P5-P6)	Não identificada
Anel 03	0,08 (P1-P2)	0,06 (P3-P6)	0,05 (P7)	Não identificada

Fonte: Autoria própria.

Notas:

(1) Indicação dos pontos considerados na análise. A localização dos pontos é indicada nas Figura 31 a 33.

Em adição, buscou-se verificar a ocorrência de fissuras penetrando o corpo de prova – sentido radial. A parafina no topo do anel foi removida próxima a região da fissura, atentando-se para que não danificasse o corpo de prova. A Figura 36 exemplifica o modo de fissuração verificada na seção radial, para determinadas amostras.

A dosagem ‘CS’ manifestou fissuras na radial em duas amostras, as quais penetraram por completo a seção transversal do anel. Por outro lado, mesmo em pequenas dosagens ($V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$), a adição de microfibras possibilitou limitar a propagação da fissura na radial. Ademais, com o incremento do volume de microfibras ($V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$), as dosagens ‘CRFPA/1,2’ e ‘CRFV-AR/1,2’ não manifestaram, preponderantemente, fissuração radial.

Figura 36: Fissuração radial na amostra 'CS – Anel 02'



Fonte: Autoria própria.

O Gráfico 10 contempla a abertura de fissura média aferida em cada subgrupo (concreto simples e com adição de microfibras) para as dosagens. Cada subgrupo consta três medidas – base (■), meio (■) e ponta da fissura (■), as quais são referenciadas, nesta ordem, da esquerda para a direita.

Os resultados indicados na Tabela 18 e no Gráfico 10 evidenciam o principal ganho associado à adição de microfibras na matriz cimentícia – redução na abertura de fissuras.

Observa-se que a dosagem 'CS' apresentou fissuras com espessura média em torno de 0,13 – 0,18 mm ao longo de toda a sua extensão, além de valores máximos superiores às amostras de concreto reforçado com microfibras, os quais alcançaram 0,17 – 0,24 mm.

Em geral, determinadas leituras na base das fissuras indicaram valores máximos próximos à amostra 'CS'. Entretanto, nota-se uma tendência de redução ao longo de sua extensão (meio e ponta da fissura). Esse fato pode ser observado juntamente com a diminuição da média e mediana dos subgrupos.

Analisando a amostra 'CRFPA/0,6', nota-se que a espessura da fissura possui uma amplitude similar ao longo da base e meio (0,14 – 0,07 mm), reduzindo significativamente apenas na ponta da fissura (0,08 – 0,05 mm).

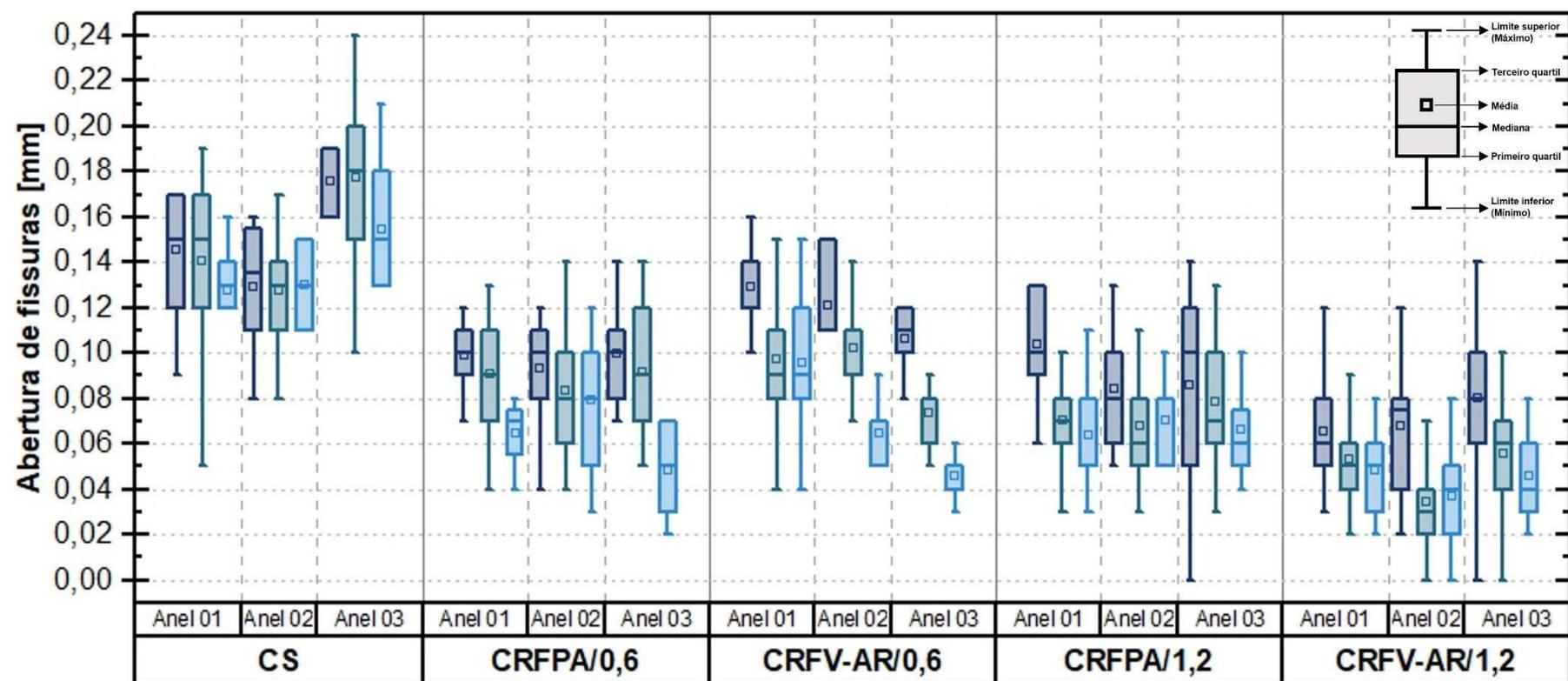
No caso da amostra 'CRFPA/1,2', embora a espessura da fissura na base se assemelhe à dosagem 'CRFPA/0,6', o incremento do volume de microfibras de poliamida possibilitou reduzir a abertura da fissura no meio de sua extensão (ver posicionamento das médias e medianas).

Dentre as amostras de CRF, a dosagem 'CRFV-AR/0,6' foi a que apresentou maiores aberturas de fissura na base. Contudo, a espessura ao longo do meio e ponta da fissura foram significativamente reduzidas. Por sua vez, a dosagem 'CRFV-AR/1,2' resultou preponderantemente numa espessura de fissura compreendida entre 0,10 – 0,02 mm. Em adição, as médias e medianas referentes a espessura das fissuras no meio e na ponta permanecem abaixo das demais amostras em CRF.

Para as amostras contendo um volume de microfibras de $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$ do volume de concreto, percebe-se que o incremento de ambas as microfibras possibilitaram, em determinadas amostras, proporcionar valores mínimos iguais a zero, indicando assim descontinuidades ao longo da extensão da fissura.

O desenvolvimento das fissuras no CRF está diretamente atrelado às características que constituem a fibra, tornando-se indispensável o seu conhecimento. Como indicado na Tabela 7, a microfibra de vidro álcali-resistente apresenta 200.000.000 fibras/kg, enquanto a microfibra de poliamida 111.000.000 fibras/kg. Portanto, considerando uma mesma dosagem [em kg/m^3 do volume de concreto], ter-se-ia uma maior concentração de microfibras de vidro álcali-resistente em determinado plano de fissura, quando comparadas às fibras de poliamida.

Gráfico 10: Análise da abertura de fissuras



Fonte: Autoria própria.

6. CONCLUSÃO

Visando aumentar a durabilidade e a vida útil das estruturas em concreto, torna-se imprescindível controlar a formação e abertura das fissuras, especialmente nas idades iniciais.

A fim de contribuir para a investigação de alternativas ao combate e mitigação da fissuração em elementos de concreto, estabeleceu-se a hipótese da aplicação de microfibras ao concreto.

Neste propósito, seguiu-se a metodologia do ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido estabelecida pela ASTM C1581/C1581M (2018). O objetivo deste trabalho foi de investigar o potencial de fissuração de duas microfibras (poliamida e vidro álcali-resistente) em dosagens de 0,60 e 1,20 kg/m³ do volume de concreto.

Sequencialmente, as seguintes conclusões são ressaltadas:

Verificação do objetivo e hipótese

Em resposta ao objetivo estabelecido nesta dissertação, conclui-se que a adição de microfibras não altera o potencial de fissuração concreto. As dosagens avaliadas neste estudo foram classificadas entre as faixas de potencial 'Alto' ou 'Moderado-alto' de fissuração. Ainda que determinadas amostras tenham resultado em pequenas taxas de tensão (q), a classificação foi limitada pelo *net time-to-cracking* (medida dependente da idade de fissuração) – situação mais desfavorável.

Todavia, os padrões de fissuração nos compósitos reforçados com microfibras se diferiram da amostra referência, apresentando, em geral, fissuras de menores dimensões e descontínuas, também denominadas *hairline cracks*.

Portanto, a adição de microfibras se mostrou satisfatória no controle da propagação e abertura das fissuras, validando a hipótese estabelecida nesta dissertação.

Avaliação da metodologia de ensaio

O ensaio de retração pelo método do anel restringido possibilitou aferir a idade de fissuração e o desenvolvimento da deformação, ao longo do tempo, das amostras avaliadas.

Entretanto, somente a metodologia estabelecida pela ASTM C1581/C1581M (2018) não foi suficiente para avaliar o desempenho e contribuição da adição de microfibras no concreto. Outro ponto a ser discutido é a grande dispersão dos dados de deformação de corpos de prova de uma mesma amostra.

No presente estudo, a fissuração foi aferida com auxílio de um microscópio digital ao longo de sua extensão no final do experimento. A análise da fissuração, como etapa complementar à metodologia, se mostrou fundamental para evidenciar a alteração no padrão de fissuração exibido pelas amostras reforçadas com microfibras, comparado à amostra referência.

Análise da abertura de fissuras nos anéis de concreto

Apesar da literatura apontar a atuação intrínseca das microfibras no controle da fissuração plástica, os resultados obtidos neste estudo evidenciam que as microfibras promovem o controle à propagação das fissuras além do estado plástico do concreto.

Com relação à manifestação patológica, o concreto simples apresentou aberturas de fissuras mais expressivas e contínuas ao longo de sua extensão, cujos valores máximos ficaram compreendidos em uma faixa de 0,17 – 0,24 mm. Enfatiza-se, por consequência, a fragilidade e suscetibilidade do concreto simples em fissurar nas idades iniciais.

Embora as amostras em CRF tenham apresentado uma abertura de fissura máxima na base próxima ao concreto simples (valores máximos entre 0,12 – 0,16 mm), observou-se uma redução na espessura da fissura ao longo de sua extensão. Em adição, verificou-se, também, que a adição de microfibras possibilitou limitar a propagação da fissuras no sentido radial, mesmo que em pequenas dosagens ($V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$).

O incremento do volume de ambas as microfibras para $V_f = 1,2 \text{ kg/m}^3$ do volume de concreto possibilitou reduzir a média da abertura de fissuras a partir do meio de sua extensão.

Com respeito ao controle da formação e propagação de fissuras, a adição microfibras de vidro álcali-resistente, na dosagem de $1,2 \text{ kg/m}^3$ do volume de concreto, mostrou-se uma alternativa adequada neste estudo.

Cr terios avaliados no ensaio de retra o por secagem restringida

Os concretos refor ados com microfibras ($V_f = 0,6 \text{ kg/m}^3$) n o incrementaram significativamente a idade de fissura o, aproximando-se do concreto simples (CS). Em adi o, verificou-se que a maioria das amostras em CRF apresentaram deforma es m ximas no mesmo n vel que a dosagem refer ncia. Por outro lado, determinadas amostras alcan aram deforma es superiores, cujo efeito resultou na fissura o antecedente ao CS.

No presente estudo, o concreto refor ado com microfibras de vidro  lcali-resistente, na dosagem de $1,2 \text{ kg/m}^3$ do volume de concreto, mostrou-se mais prop cio em prolongar a idade de fissura o da matriz, 12  dia. Apesar da taxa de tens o ser inferior  s demais amostras, o comp sito fora classificado como potencial moderado-alto de fissura o.

6.1. Sugest es para trabalhos futuros

Ressalta-se que o programa experimental conduzido nesta disserta o   v lido   fins comparativos entre as dosagens avaliadas, somente. Espera-se que os resultados contribuam com a literatura e no desenvolvimento de futuros estudos.

Ciente da necessidade de estudos aprofundados nesta  rea, sugere-se os seguintes t picos para trabalhos futuros:

- Investigar a origem da amplitude entre as curvas de deforma o apresentadas no mesmo anel. Verificar se deforma es mais acentuadas s o registradas quando o extens metro est  mais pr ximo da proje o da fissura;
- Avaliar as dosagens aplicadas nesta pesquisa, assim como outras matrizes, e expandir a faixa de teores para as microfibras de vidro  lcali-resistente e poliamida;
- Estudar a aplica o de um *blend* de micro- e macrofibras. Em complemento, avaliar a possibilidade de substitui o parcial do teor de macrofibras por microfibras, com a finalidade de controlar a fissura o por retra o;
- Verificar o efeito combinado das microfibras com outras tecnologias voltadas   mitiga o da retra o.

7. REFERÊNCIAS

AÏTCIN, P.-C. Autogenous shrinkage measurement. In: TAZAWA, Ei-Ichi (Eds). *Autogenous Shrinkage of Concrete*. 1. ed. CRC Press, 1999. 427 p. Inclui índice. ISBN 0-419-23890-5, cap. 17, p. 257-268.

AÏTCIN, Pierre-Claude; NEVILLE, Adam; ACKER, Paul. Integrated view of shrinkage deformation. *Concrete International*, v. 19, n. 9, p. 35-41, 1997.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). AASHTO T 334-08 – Standard method of test for estimating the cracking tendency of concrete. Washington, DC, 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 209.1R-05 – Report on factors affecting shrinkage and creep of hardened concrete. Farmington Hills, Michigan, July, 2005.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 224.1R-07 – Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures. Farmington Hills, Michigan, June, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 231R-10 – Report on Early-age Cracking: Causes, Measurement, and Mitigation. Farmington Hills, Michigan, January, 2010.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 302.1R-15 – Guide to concrete floor and slab construction. Farmington Hills, Michigan, June, 2015.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI 360R-10 – Guide to design of slabs-on-ground. Farmington Hills, Michigan, June, 2010. ISBN: 9780870313714.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). ACI PRC-544.11 – Measuring Shrinkage, Creep, and Transport Properties of Fiber-Reinforced Concrete – Report. Farmington Hills, Michigan, July, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1579-21, Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert). ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. DOI: 10.1520/C1579-21.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1581/C1581M – 18a, Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristic of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018. DOI: 10.1520/C1581_C1581M-18A.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1608-17, Standard Test Method for Chemical Shrinkage of Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. DOI: 10.1520/C1608-17.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1698-19, Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Past and Mortar. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. DOI: 10.1520/C1698-19.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16834: Concreto – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2020a.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16935: Projeto de estruturas de concreto reforçados com fibras – Procedimento. Rio de Janeiro, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16941: Fibras de vidro álcali-resistentes (AR) para concreto e argamassa — Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16942: Fibras poliméricas para concreto – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2021d.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015b.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Rio de Janeiro, 2021f.

AYOUBI, Mazen; MAHREHOLTZ, Christoph; NELL, Wilhelm. Influence of the Steel Fibres on the Tension and Shear Resistance of Anchoring with Anchor

Channels and Channel Bolts Cast in Concrete. In: RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete. Springer, Cham, 2020. p. 221-232.

BALBO, J.T. Pavimentos de Concreto. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 472 p. Inclui índice. ISBN 978-85-86238-90-1.

BAŽANT, Z. P. Theory of creep and shrinkage in concrete structures: a précis of recent developments. *Mechanics Today*, 2, pp. 1–93, 1975. doi: 10.1016/B978-0-08-018113-4.50007-0.

BENTUR, A.; MINDNESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. 2 ed. London: CRC Press, 1990. 603 p. Inclui índice.

BISSCHOP, Jan. Drying shrinkage cracking at early ages. In: BENTUR, A. (Eds.). *Early Age Cracking in Cementitious Systems - Report of RILEM Technical Committee 181-EAS - Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems*. Bagnex: RILEM Publications SARL, 2003. ISBN 2-912143-33-0, cap. 3, p. 47-55.

BORGES, Ana Paula Silva Nascentes; MOTTA, Leila Aparecida De Castro; PINTO, Eliane Bernardes. Estudo Das Propriedades De Concretos Com Adição De Fibras Vegetais E De Polipropileno Para Uso Em Paredes Estruturais. *Matéria* (Rio De Janeiro), v. 24, 2019.

BOSHOFF, William P.; COMBRINCK, Riaan. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 48, p. 34-39, 2013.

BRIFFAUT, M.; BENBOUDJEMA, F.; D'ALOIA, L. Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part I: Laboratory ring test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v. 59, p. 215-220, 2016.

BROOKS, J. J. Concrete and Masonry movements. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. 612 p. Inclui índice. ISBN 978-0-12-801525-4.

CARNIO, M. A. Aspectos gerais sobre o uso do concreto reforçado com fibras no Brasil: produção, projeto, tecnologia, normalização. *CONCRETO & CONSTRUÇÃO*, v.45, p. 26-32, 2017.

CHOI, Kyoung-Kyu; CHOI, Hajin; KIM, Jong-Chan. Shrinkage Cracking of Amorphous Metallic Fibre-Reinforced Concrete. *Proceedings Of the Institution Of Civil Engineers-Structures And Buildings*, V. 168, N. 4, p. 287-297, 2015.

COMBRINCK, Riaan; STEYL, Lourens; BOSHOFF, William P. Interaction between settlement and shrinkage cracking in plastic concrete. *Construction and Building Materials*, v. 185, p. 1-11, 2018.

DOBSON, Gregory. Concrete floor slabs: recognizing problems before they happen. *Concrete International*, v. 17, n. 6, p. 45-47, 1995.

dos SANTOS MOTTA, Mariana; SOUZA, Lourdes Maria Silva de; DE ANDRADE SILVA, Flávio. Early-age shrinkage of cement pastes with polypropylene and curaua fibres. *Advances in Cement Research*, v. 33, n. 4, p. 156-167, 2021.

DØSSLAND, Åse Lyslo. Fibre reinforcement in load carrying concrete structures: laboratory and field investigations compared with theory and finite element analysis. 2008. 254 f. Tese (doutorado) – Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Trondheim, Trøndelag.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; DE MEDEIROS QUININO, U.C. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras novas e recicladas de poliéster. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 195-209, jul./set. 2018. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000300276>

EHRENBRING, H.Z. *et al.* Experimental method for investigation of impact of the addition of polymer fibers on drying shrinkage and cracking for concretes. *Structural Concrete*. 2019;1–12. <https://doi.org/10.1002/suco.201800228>

EHRENBRING. Hinoel Zamis. Comportamento de concretos reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL) em relação à retração por secagem restringida e às propriedades mecânicas. São Leopoldo, 2017. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo.

EPPERS, Sören. Assessing the autogenous shrinkage cracking propensity of concrete by means of the restrained ring test. 2011. 178 f. Tese (Doutorado) – Technische Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Dresden, Sachsen, 2010.

FARIA, Breno Macedo; SANTOS, Victoria Vazzoler Rodrigues dos. Concreto reforçado com fibras para pisos industriais. In: IBRACON, 2020, Florianópolis. 62° Congresso Brasileiro do Concreto.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON (*fib*). Model Code 2010: Model Code for Concrete Structures. Fédération Internationale du Béton (*fib*): Lausanne, Switzerland, 2013.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Concreto reforçado com fibras. 2011. 248 f. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GEA DOS SANTOS, Fabio Luis. Estudo e automação da influência da taxa de carregamento na resposta em fratura quase-frágil. 2014. 132 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, SP.

GOMES, Carlos Eduardo Marmorato. Propriedades da pasta de cimento portland com adições do copolímero Va/VeoVa e fibras de poliamida-estudo da interface fibra-matriz. 2005. Tese de Doutorado. University of São Paulo.

GRUBBS, Frank E. Procedures for detecting outlying observations in samples. *Technometrics*, v. 11, n. 1, p. 1-21, 1969.

GUZLENA, S.; SAKALE, G. Alkali resistant (AR) glass fibre influence on glass fibre reinforced concrete (GRC) flexural properties. In: RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete. Springer, Cham, 2021. p. 262-269.

HATT, W.K. Notes on the effect of time element in loading reinforced concrete beams. *Proc. ASTM* 7, 421-433, 1907.

HOLT, Erika. Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and concrete research*, v. 35, n. 3, p. 464-472, 2005.

HOSSAIN, Akhter B.; WEISS, Jason. The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained ring test. *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 1, p. 189-199, 2006.

HOTTINGER BRÜEL & KJAER GmbH (HBM). QuantumX: Operating manual. 2021. Disponível em: < https://www.hbm.com/pt/2129/quantumx-mx840b-amplificador-universal-de-8-canalais/#f58858s?product_type_no=QuantumX%20MX840B/MX440B:%20M%C3%B3dulo%20de%20aquisi%C3%A7%C3%A3o%20universal >. Acesso em: 09 set. 2022.

HULETT, Tony; CLARKE, John. Technical report 34: Concrete industrial ground floors – A guide to design and construction. The Concrete Society (London), v. 37, n. 2, p. 22-29, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO/ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CONSULTORIA E ENGENHARIA ESTRUTURAL. Prática recomendada IBRACON/ABECE: Projeto de estruturas de concreto reforçado com fibras. 1 ed. São Paulo: IBRACON/ABECE, 2016, 39 p. ISBN 978-85-98576-26-8.

INSTITUTO BRASILEIRO DE TELAS SOLDADAS (IBTS). Novos critérios para pavimentos industriais de concreto armado. São Paulo, 2015.

JENSEN, O.M.; HANSEN, P.F. A Dilatometer for Measuring Autogenous Deformation in Hardening Portland Cement Paste. *Mater. Struct.*, 28(181), 406-409, 1995.

KIM, Byounggeon; WEISS, W. Jason. Using acoustic emission to quantify damage in restrained fiber-reinforced cement mortars. *Cement and concrete research*, v. 33, n. 2, p. 207-214, 2003.

KORDSA. Concrete Reinforcements: Technologies. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.kordsa.com/en/products/detail/construction-reinforcement/32/46/0>>. Acesso em: 28 de maio 2022.

KWON, Seung-Hee *et al.* Cracking of fiber-reinforced self-compacting concrete due to restrained shrinkage. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 1, n. 1, p. 3-9, 2007.

LAWLER, J. S. *et al.* Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar. *Materials and Structures*, v. 36, n. 3, p. 197-208, 2003.

LIM, Jin-Sun; KIM, Sung-Hee; JEONG, Jin-Hoon. Testing and analysis of viscoelastic characteristics of solidifying concrete pavement slabs. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 18, n. 4, p. 1063-1071, 2014.

MAJ, Marek; UBYSZ, Andrzej. Cracking of composite fiber-reinforced concrete foundation slabs due to shrinkage. *Materials Today: Proceedings*, v. 38, p. 2092 - 2098, 2021.

MAZZOLI, Alida; MONOSI, Saveria; PLESCIA, Eleonora Stella. Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 596-601, 2015.

MC-BAUCHEMIE Indústria e Comércio LTDA. Ficha técnica: MC-TechniFlow 525. 2022. Disponível em: < <https://www.mc-bauchemie.com.br/produtos/aditivos-para-concreto/plastificantes-mid-range/mc-techniflow-525.html> >. Acesso em: 06 de janeiro 2023.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 4 ed. Nova Iorque: McGraw Hill LLC, 2013. 955 p. Inclui índice. ISBN: 978-0-07-179788-7.

MELO NETO, A. A. *et al.* Retração restringida e fluência por tração: desenvolvimento de equipamento e metodologia. In: IBRACON, 2008, Salvador. 50° Congresso Brasileiro do Concreto.

MOHR, B. J.; HOOD, K. L. Factors Influencing Mitigation Strategies for Autogenous Shrinkage. *Advances in Civil Engineering Materials*, v. 7, n. 4, p. 672-690, 2018.

MORAES, G.P.; FORTI, N.C.S. Estudo da fissuração do concreto reforçado com fibras. In: XXVI Encontro de Iniciação Científica e XI Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2021.

MYNARČÍK, Petr. Technology and trends of concrete industrial floors. *Procedia Engineering*, v. 65, p. 107-112, 2013.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. *Tecnologia do Concreto*. Tradução de Ruy Alberto Cremonini. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p. Inclui índice. ISBN 978-85-8260-072-6. (Título original: *Concrete Technology*).

OWENS CORNING. Anti-crack HD: Crack mitigation smooth finish. 2021. Disponível em: < <https://www.owenscorning.com/en-us/composites/product/anti-crak-chopped-strands-hd> >. Acesso em: 18 de maio 2022.

PAES, I. *et al.* Reparo de piso industrial com revestimento em resinas poliméricas: estudo de caso. In: IBRACON, 2020, Florianópolis. 62° Congresso Brasileiro do Concreto.

PASSUELLO, Alexandra; MORICONI, Giacomo; SHAH, Surendra P. Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. *Cement and Concrete Composites*, v. 31, n. 10, p. 699-704, 2009.

RODRIGUES, P.P.F. *Pisos industriais com concreto de retração compensada*. São Paulo: J.J. Carol Editora, 2019. 472 p. ISBN 978-8554274047.

SAFIUDDIN, Md *et al.* Early-age cracking in concrete: Causes, consequences, remedial measures, and recommendations. *Applied Sciences*, v. 8, n. 10, p. 1730, 2018.

SANTOS, S.B. do. *Fenômeno térmico do concreto: Fundamentos e aplicações práticas*. 1 ed., Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2019. 158 p. ISBN 978-85-7193-419-1.

SARADAR, Ashkan *et al.* Restrained shrinkage cracking of fiber-reinforced high-strength concrete. *Fibers*, v. 6, n. 1, p. 12, 2018.

SEE, Heather T.; ATTIOGBE, Emmanuel K.; MILTENBERGER, Matthew A. Shrinkage cracking characteristics of concrete using ring specimens. *Materials Journal*, v. 100, n. 3, p. 239-245, 2003.

SEE, Heather T.; ATTIOGBE, Emmanuel K.; MILTENBERGER, Matthew A. Potential for restrained shrinkage cracking of concrete and mortar. *Cement, Concrete and Aggregates*, v. 26, n. 2, p. 1-8, 2004.

SHAH, H. R.; WEISS, J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test. *Materials and structures*, v. 39, n. 9, p. 887-899, 2006.

SHEN, Dejian *et al.* Effect of Double Hooked-End Steel Fiber on Early-Age Cracking Potential of High Strength Concrete in Restrained Ring Specimens. *Construction And Building Materials*, V. 223, P. 1095-1105, 2019.

SINGH, H. Steel fiber reinforced concrete: behavior, modelling and design. Singapore: Springer Science & Business Media, 2017. 172 p. Inclui índice. ISBN 978-981-10-2506-8.

SUKSAWANG, Nakin; YOHANNES, Daniel. Using Fiber Reinforced Concrete to Control Early-Age Shrinkage in Replacement Concrete Pavement. In: RILEM-fib International Symposium on Fibre Reinforced Concrete. Springer, Cham, 2020. p. 12-23.

TAVARES, S.V.; FORTI, N.C.S. Análise comparativa da retração por secagem de concretos com fibras de poliamida e de vidro. In: XXVII Encontro de Iniciação Científica e XII Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, 2022.

TAZAWA, Ei-Ichi. Autogenous Shrinkage of Concrete. 1. ed. CRC Press, 1999. 427 p. Inclui índice. ISBN 0-419-23890-5.

TRAN, Nghia P. *et al.* A critical review on drying shrinkage mitigation strategies in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, v. 38, p. 102210, 2021.

WANG, Lei *et al.* The influence of fiber type and length on the cracking resistance, durability and pore structure of face slab concrete. *Construction and building materials*, v. 282, p. 122706, 2021.

YOUSEFIEH, Negin; JOSHAGHANI, Alireza; HAJUBANDEH, Erfan; SHEKARCHI, Mohammad. Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete. *Construction and Building Materials*, v. 148, p. 833-845, 2017.

ZHANG, Tongsheng *et al.* Measurement of chemical shrinkage of cement paste: Comparison study of ASTM C 1608 and an improved method. *Construction and building materials*, v. 48, p. 662-669, 2013.

APÊNDICE A. ESTUDO DO AMBIENTE TESTE

O presente apêndice contempla um trabalho conjunto realizado com o grupo de Tecnologia do Ambiente Construído da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, englobando dois projetos de Iniciação Científica.

Haja visto as condições ambientais preconizadas pela ASTM C1581/C1581M (2018), buscou-se avaliar a deformação dos anéis de concreto em três cenários de ambiente teste, sendo:

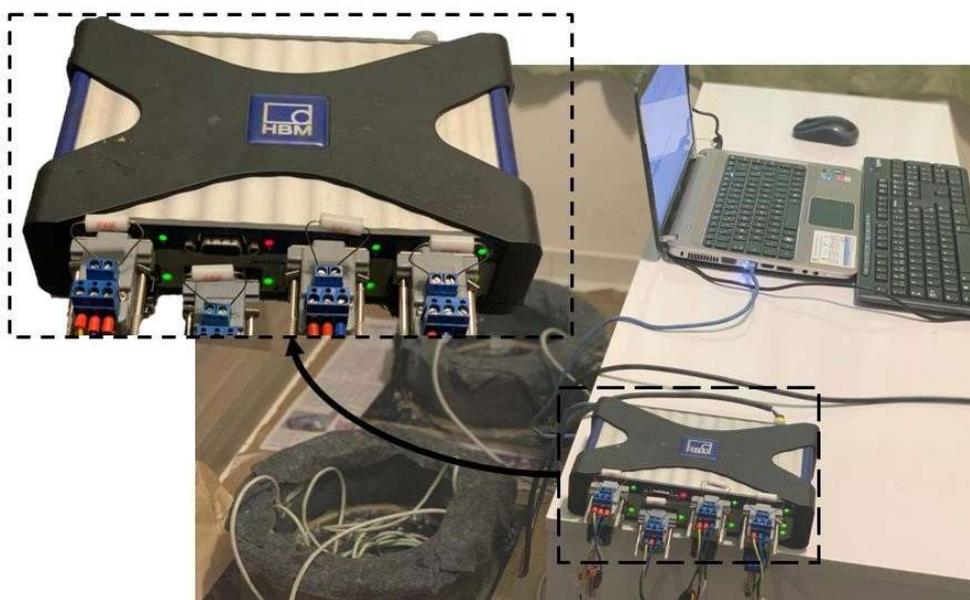
Ambiente Teste I. Anéis expostos à temperatura ambiente, conforme estudo apresentado por Moraes e Forti (2021), onde a temperatura no local foi ajustada com auxílio de um umidificador de ar para ambiente;

Ambiente Teste II. Anéis armazenados dentro das ‘caixas de ensaio’, conforme estudo apresentado por Tavares e Forti (2022);

Ambiente Teste III. Anéis e componentes dentro das ‘caixas de ensaio’ (presente dissertação), sendo conectados ao sistema de aquisição de dados por meio dos cabos manga.

No cenário do Ambiente Teste I, os cabos manga ligados aos extensômetros foram conectados diretamente ao sistema de aquisição de dados (QuantumX MX840B, HBM), como apresentado na Figura 37.

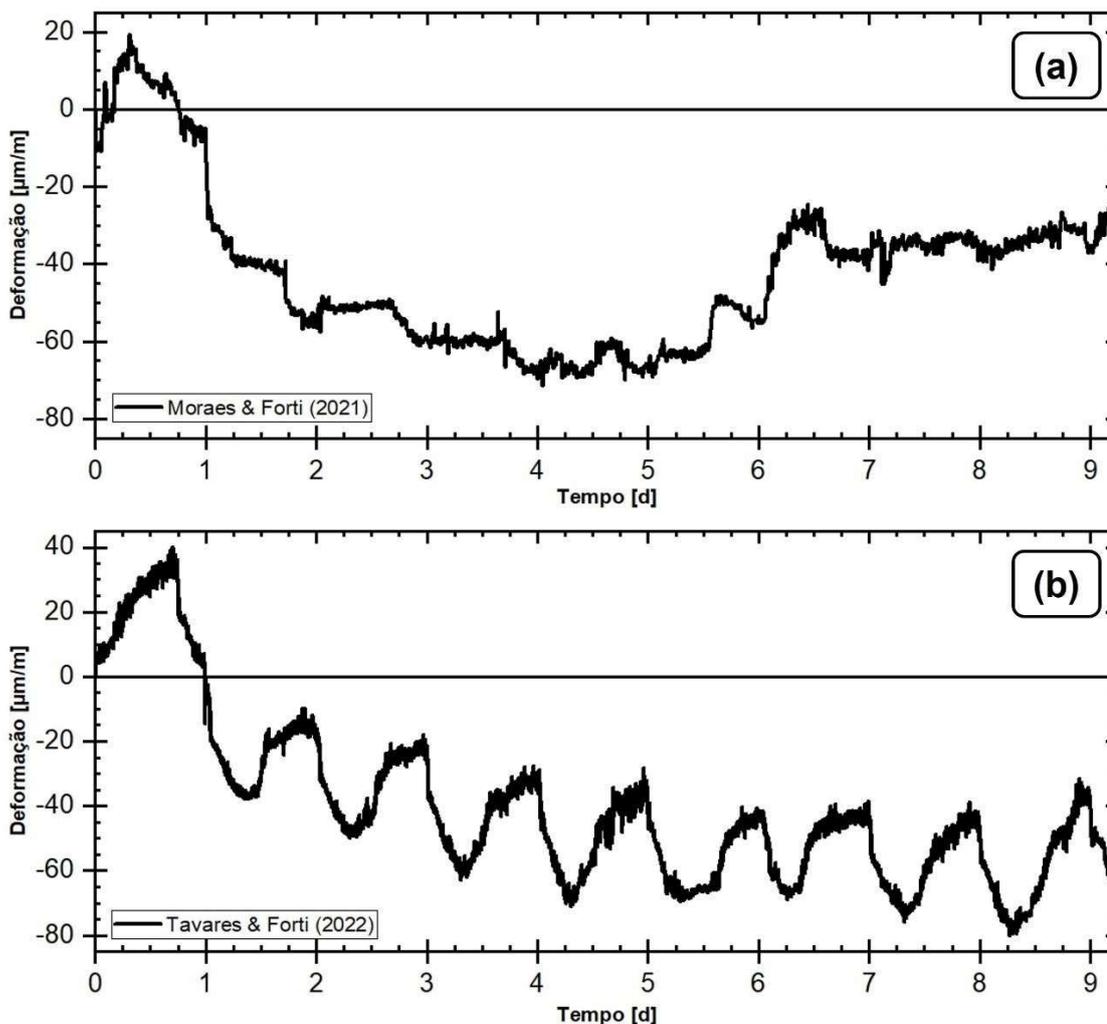
Figura 37: Configuração do Ambiente Teste I



Fonte: Autoria própria.

Como resultado, o Gráfico 11 indica as curvas de Deformação do anel de aço interno versus Tempo para o concreto simples obtidos por Moraes & Forti (2021) e Tavares & Forti (2022).

Gráfico 11: Deformação versus tempo para o concreto simples exposto no (a) Ambiente teste I; e (b) Ambiente teste II



Fonte: Baseado em (a) Moraes & Forti (2021); e (b) Tavares & Forti (2022).

Especula-se que as flutuações na deformação do anel de aço sejam decorrentes da oscilação de temperatura do ambiente de ensaio.

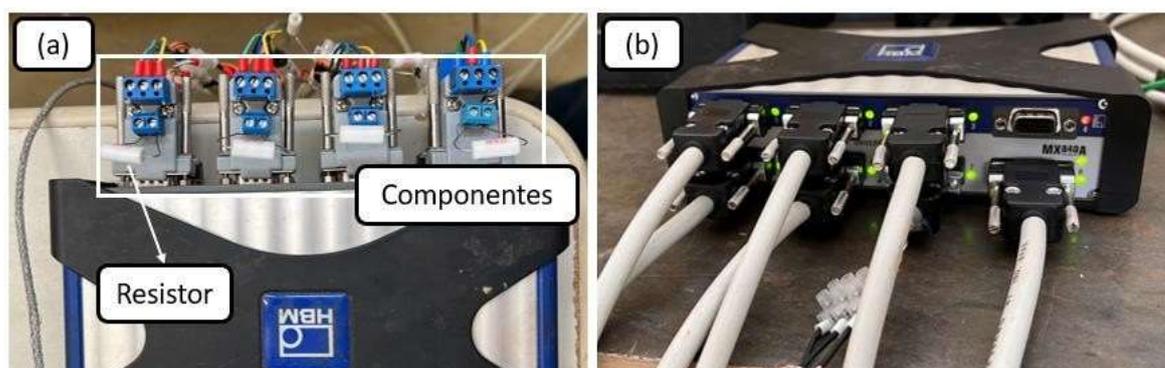
Nota-se que Tavares & Forti (2022) obtiveram oscilações estilo 'dente de serra' (ver Gráfico 11b), as quais acredita-se que tenham sido decorrentes da variação de temperatura externa somado ao fato de os componentes estarem próximos ao equipamento de aquisição de dados – HBM. Apesar da mesma configuração ter sido aplicada em Moraes & Forti (2021), as condições do ambiente externa foram mais bem controladas.

Como alternativa, este estudo propôs o posicionamento dos componentes dentro das 'caixas de ensaio'. Assim, os resistores estariam submetidos à variação de temperatura interna à caixa, assim como os compósitos cimentícios.

Em adição, durante as primeiras 24 h, Tavares & Forti (2022) mantiveram as 'caixas de ensaio' isoladas. Desta maneira, observou-se um aumento expressivo na umidade relativa decorrente do procedimento de cura adotado.

Portanto, diferenciando-se da configuração de ensaio aplicada em Tavares e Forti (2022) – ver Figura 38a, cabos de 'extensão' foram produzidos com o intuito de manter os componentes dentro das 'caixas de ensaio', como no caso da Figura 38b.

Figura 38: Conexão dos cabos de comunicação no sistema de aquisição de dados, sendo (a) com os componentes próximos ao HBM; e (b) através das extensões.



Fonte: Autoria própria.

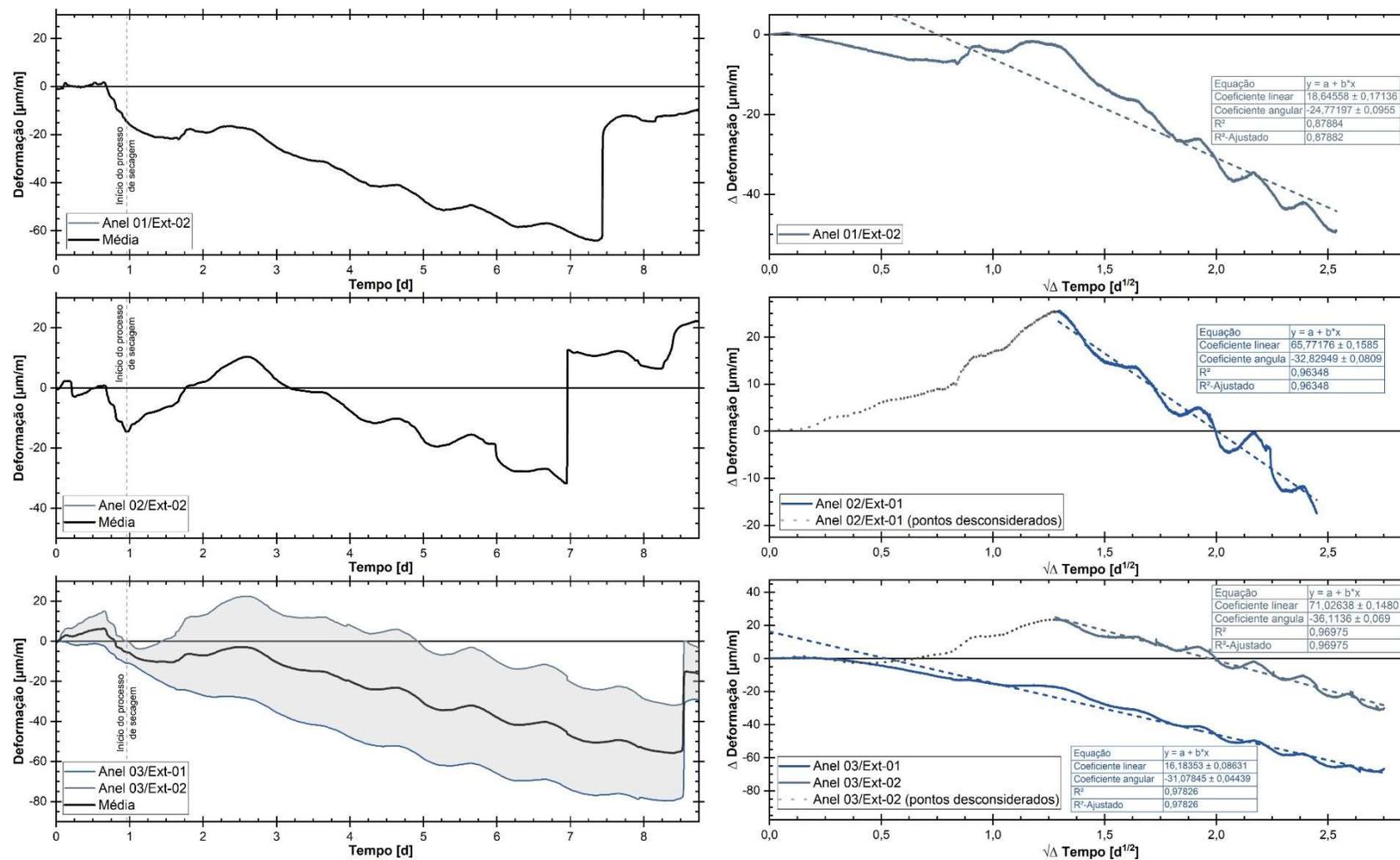
APÊNDICE B. CURVAS COMPLEMENTARES DO ENSAIO DE RETRAÇÃO POR SECAGEM PELO MÉTODO DO ANEL RESTRINGIDO

Neste apêndice, os seguintes tópicos são retratados nas Figura 39 a 43:

- I. Curvas individuais de 'Deformação do anel de aço interno *versus* Tempo' registradas por cada extensômetro durante o ensaio de retração por secagem restringida;
- II. Área hachurada, quando aplicável, entre as curvas do grupo de extensômetros do mesmo anel, cuja função está em denotar a amplitude entre os valores mensurados por cada extensômetro;
- III. Média das curvas 'Deformação do anel de aço interno *versus* Tempo' para cada anel, as quais são posteriormente indicadas no item 5.1.1 (página 73);
- IV. Curvas individuais ' Δ Deformação *versus* $\sqrt{\Delta}$ Tempo', calculadas conforme descrito no item 4.3.4 (página 68);
- V. Reta obtida pela regressão linear das curvas ' Δ Deformação *versus* $\sqrt{\Delta}$ Tempo' para cada extensômetro. O coeficiente angular e linear da reta $\varepsilon_{net} = \alpha\sqrt{t} + k$ são indicados nos próprios gráficos, assim como o coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de determinação ajustado (R^2 -Ajustado).

Em determinadas amostras houve falha na aquisição de dados. O intervalo prejudicado é especificado nas notas abaixo de cada figura. Cumpre salientar que as falhas de aquisição nas curvas não prejudicaram a continuidade do ensaio e, posteriormente, os procedimentos de cálculo. Nestes períodos, o equipamento permanecera conectado, porém sem registrar (salvar) os dados. Assim, ao retomar a aquisição, prosseguiu-se do ponto de deformação verificado na leitura precedente.

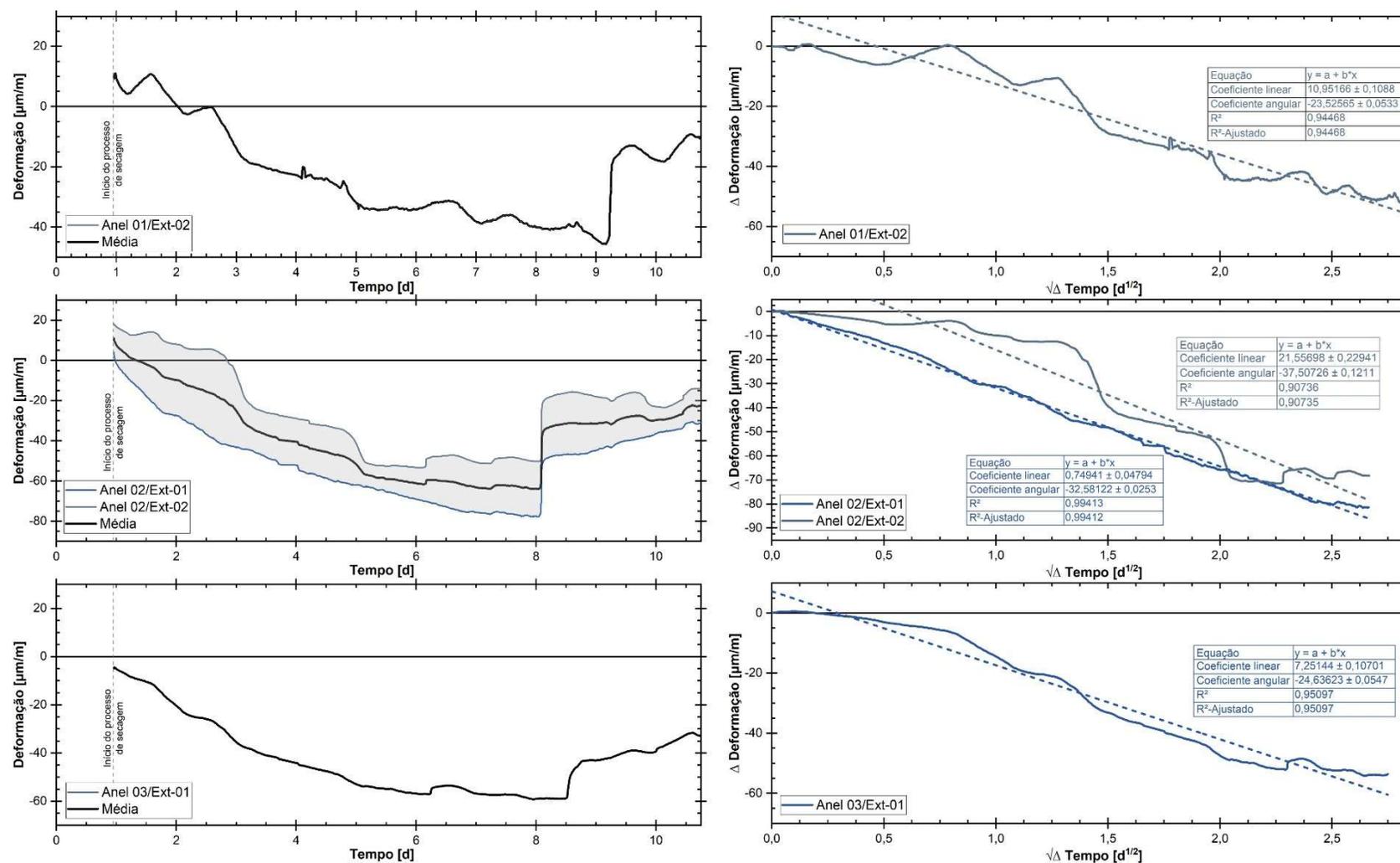
Figura 39: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e 'Net strain versus Elapsed time^{1/2}' (direita) – Dosagem CS



Fonte: Autoria própria.

Notas: Ensaio prejudicado no anel 02 e no anel 03 [extensômetro 02] – intervalo [0,96;2,63] dias.

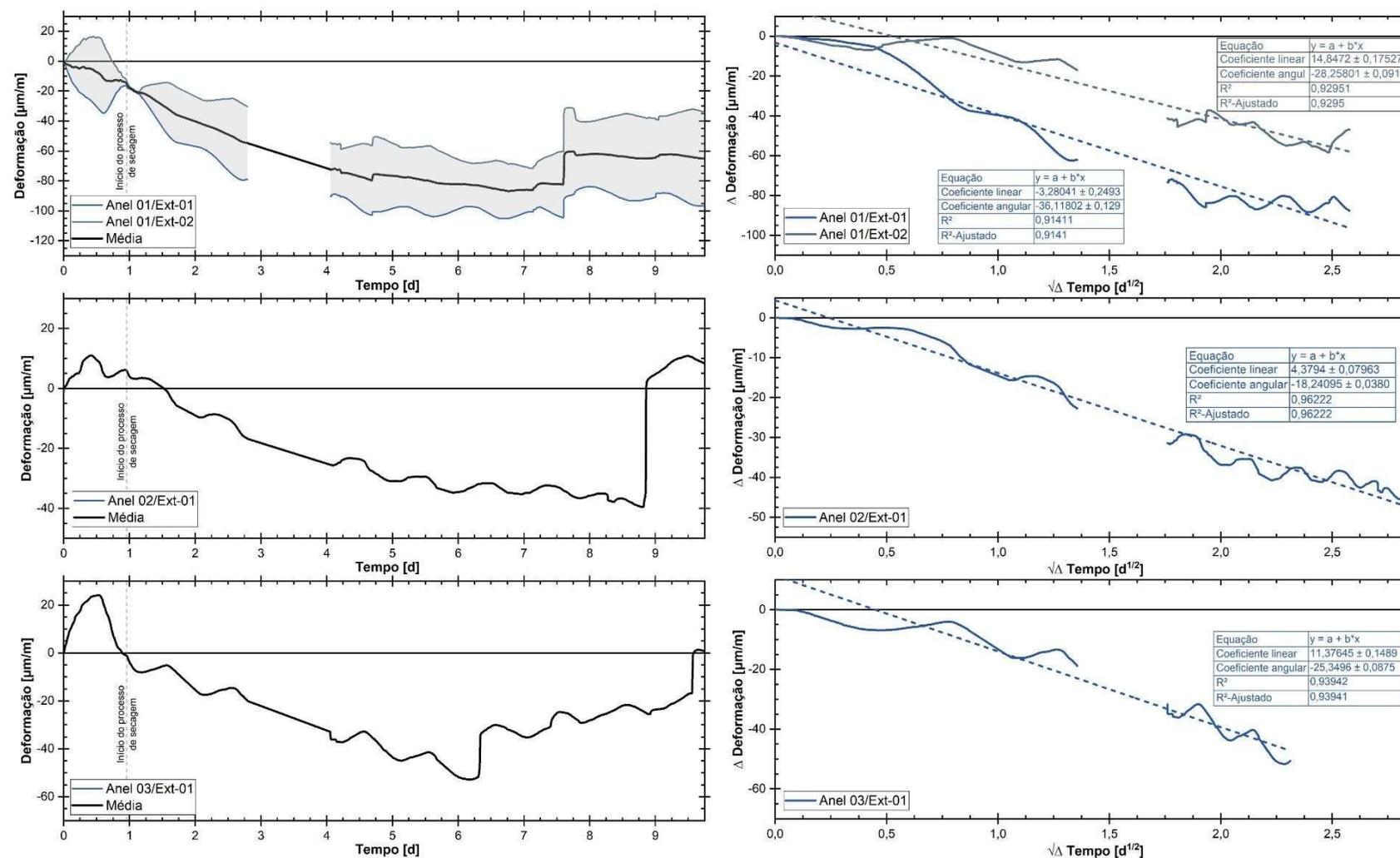
Figura 40: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e 'Net strain versus Elapsed time^{1/2}' (direita) – Dosagem CRFPA/0,6



Fonte: Autoria própria.

Notas: Ensaio prejudicado para todas as amostras no intervalo [0,00; 0,96] dias.

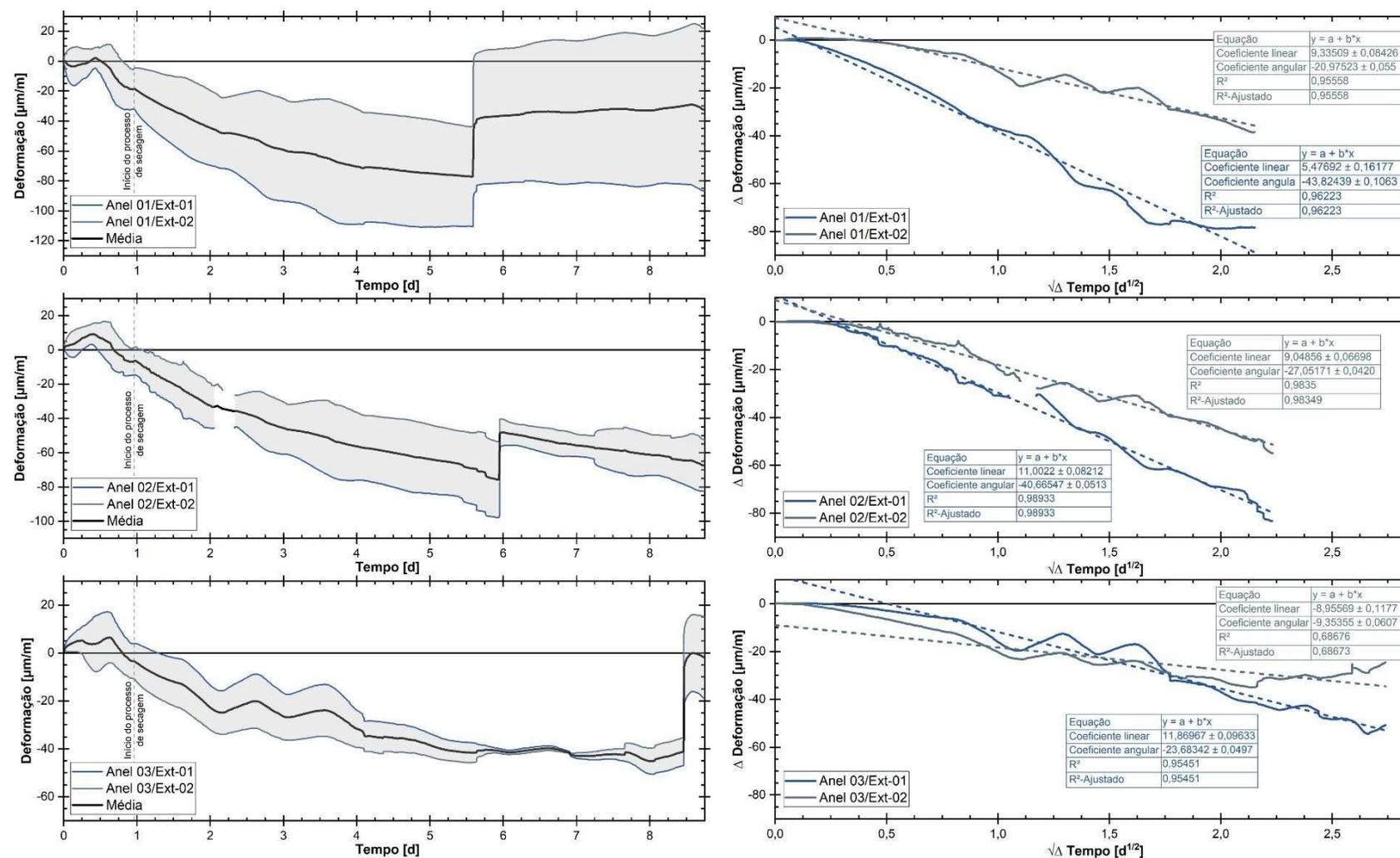
Figura 41: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e 'Net strain versus Elapsed time^{1/2}' (direita) – Dosagem CRFPA/1,2



Fonte: Autoria própria.

Notas: Ensaio prejudicado para todas as amostras no intervalo [2,79; 4,06] dias.

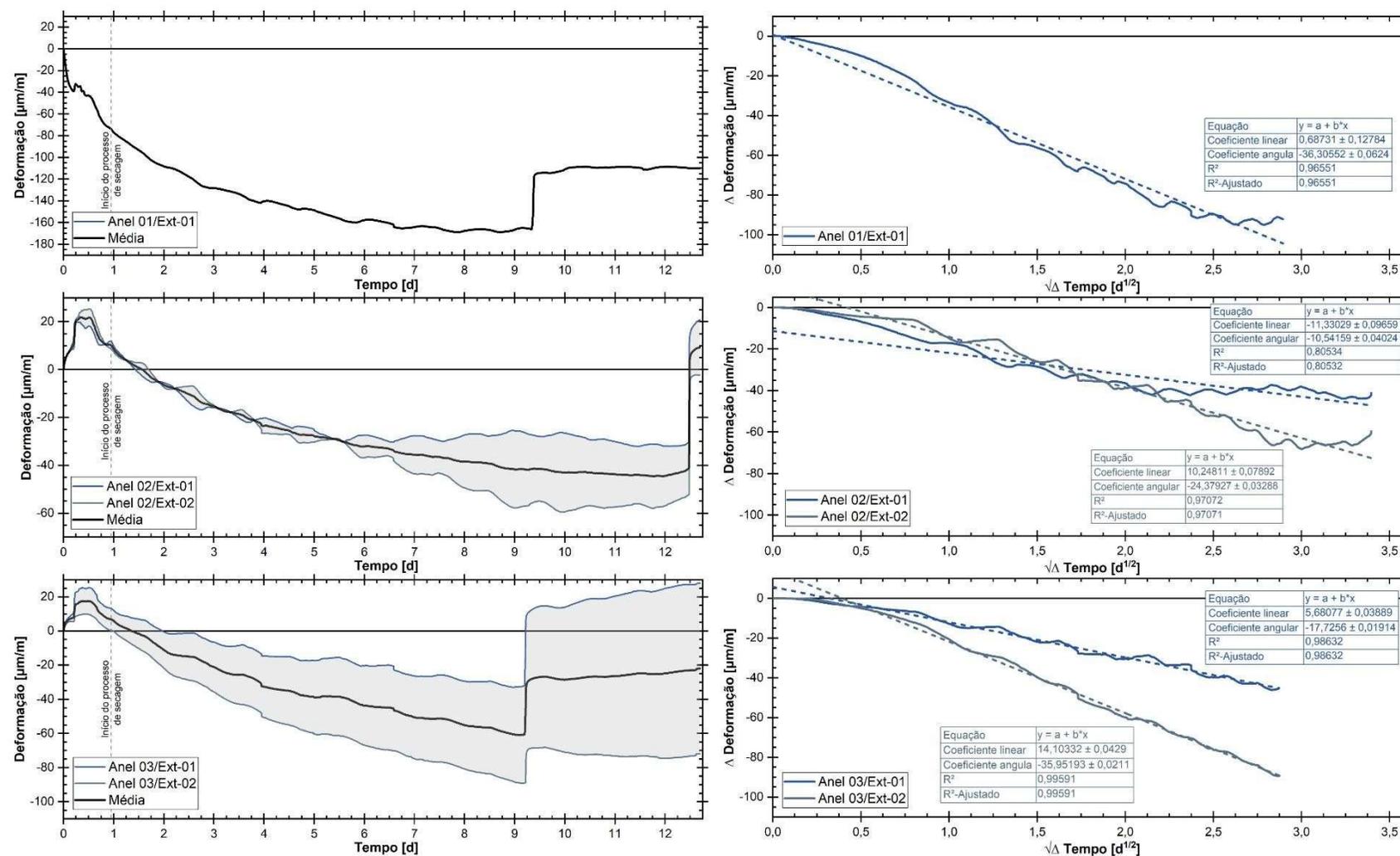
Figura 42: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e 'Net strain versus Elapsed time^{1/2}' (direita) – Dosagem CRFV-AR/0,6



Fonte: Autoria própria.

Notas: Ensaio prejudicado no anel 02 no intervalo [2,06;2,33] dias.

Figura 43: Registro das curvas de 'Deformação versus Tempo' (esquerda) e 'Net strain versus Elapsed time^{1/2}' (direita) – Dosagem CRFV-AR/1,2



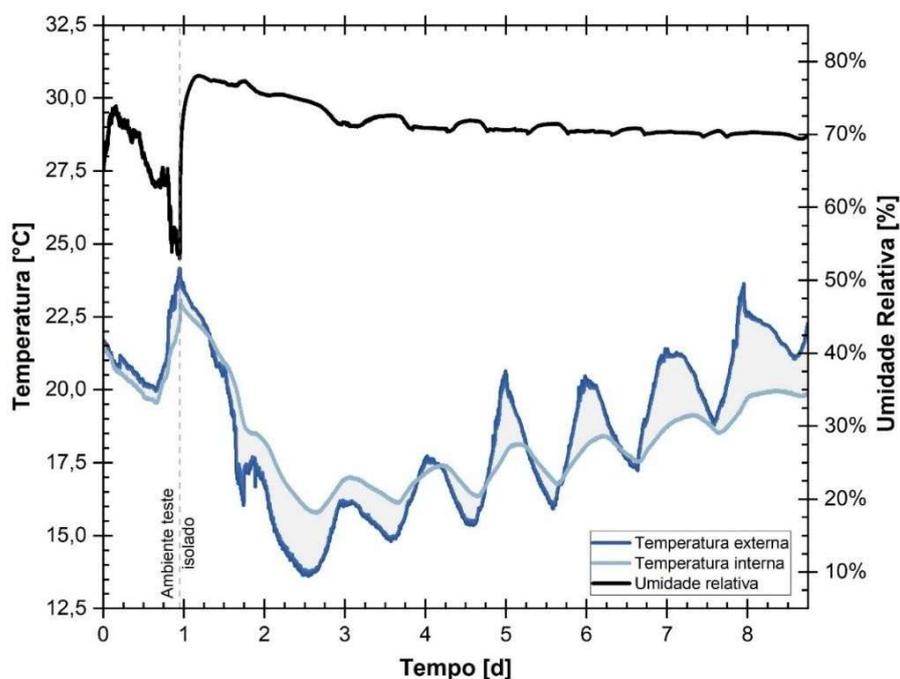
Fonte: Autoria própria.

Notas: Curvas referentes ao anel 01 desconsideradas – ensaio prejudicado.

APÊNDICE C.REGISTRO DO AMBIENTE TESTE

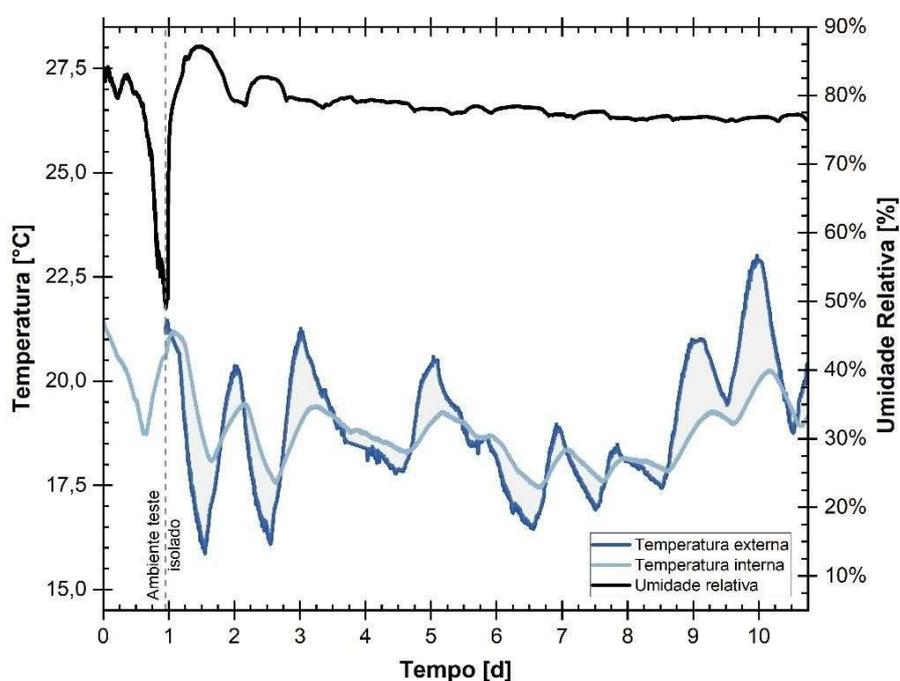
Neste tópico, a Figura 44 a 48 indica as condições do ambiente teste (ver descrição no item 4.3.2 – página 65) para as distintas amostras durante o ensaio de retração por secagem pelo método do anel restringido.

Figura 44: Condições do ambiente teste – Amostra CS



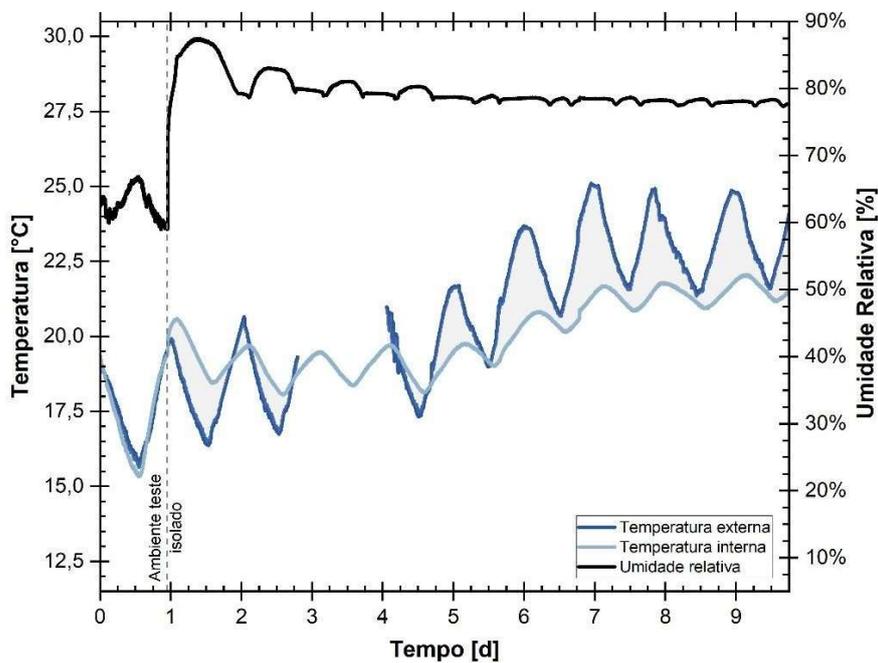
Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Condições do ambiente teste – Amostra CRFPA/0,6



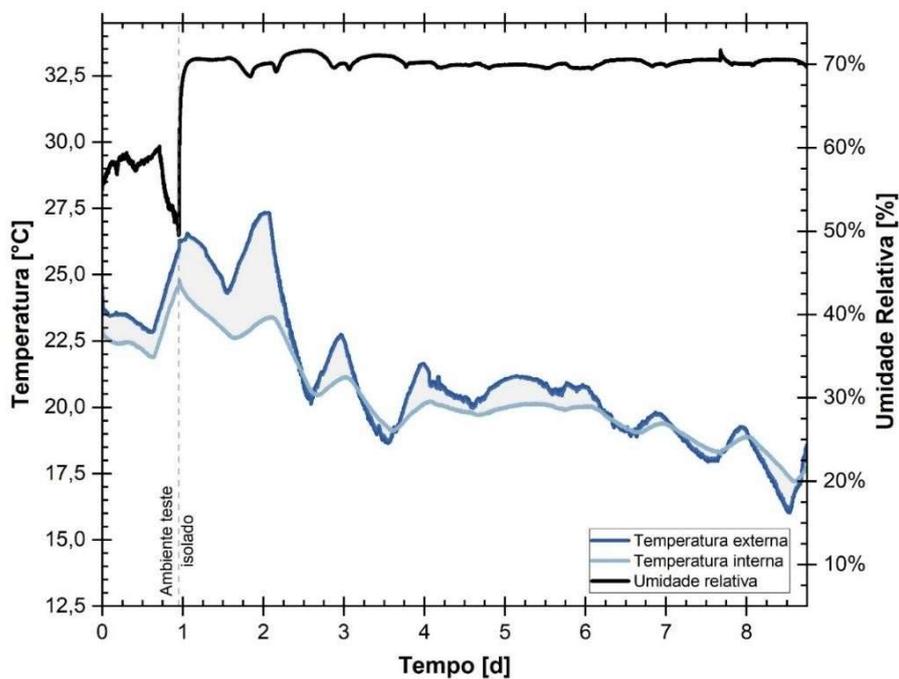
Fonte: Autoria própria.

Figura 46: Condições do ambiente teste – Amostra CRFPA/1,2

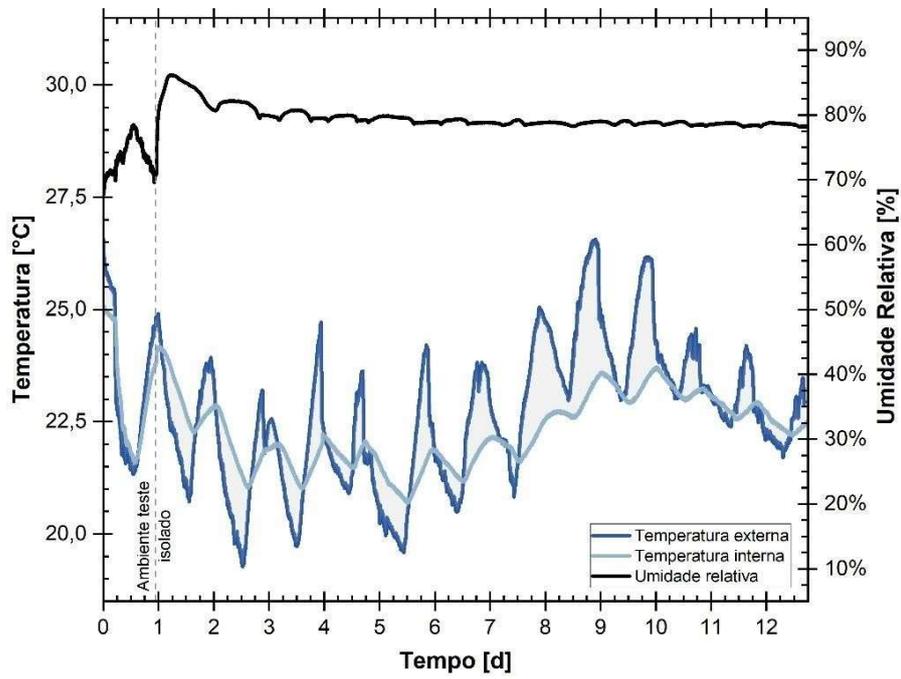


Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Condições do ambiente teste – Amostra CRFV-AR/0,6



Fonte: Autoria própria.

Figura 48: Condições do ambiente teste – Amostra CRFV-AR/1,2

Fonte: Autoria própria.