



**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

HINOEL ZAMIS EHRENBRING

**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

HINOEL ZAMIS EHRENBRING

**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**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –
UNISINOS.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Coorientador: Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino

São Leopoldo

2017

E33c 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 / Hinoel Zamis Ehrenbring. – 2017.
165 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2017.
“Orientador: Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian ;
coorientador: Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino.”

1. Retração por secagem. 2. Concreto reforçado com microfibras. 3. Potencial de fissuração. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

HINOEL ZAMIS EHRENBRING

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

Esta Dissertação de Mestrado foi julgada e aprovada pela banca examinadora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovado por:

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian

Orientador

Prof. Dr. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino

Coorientador

Prof^a. Dr^a. Luciana Paulo Gomes

Coordenadora do PPGEC/UNISINOS

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Antônio Domingues de Figueiredo (USP)

Dr. pela Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Jean Marie Désir (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Cláudio de Sousa Kazmierczak (UNISINOS)

Dr. pela Universidade de São Paulo

SÃO LEOPOLDO, RS – BRASIL

Agosto/2017

Dedico esse trabalho
aos meus pais Dulce e Leoni
e em memória a minha querida avó Anita.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Leoni, um exemplo de pessoa, um grande homem, pela confiança, pelo carinho, pela educação, e por estar presente em todas as etapas da minha vida. À minha mãe, Dulce, uma guerreira, um exemplo para mim, pelas conversas, pela sensibilidade, pela educação e por sempre estar ao meu lado. Vocês sempre me incentivaram na minha caminhada acadêmica e, principalmente, pessoal. Sem vocês, Leoni e Dulce, nada disso seria realidade. Eu amo vocês.

À minha namorada, amiga, companheira, Karine, agradeço pelo carinho, por ser paciente e estar sempre ao meu lado.

Um agradecimento especial aos meus orientadores, prof. Bernardo Fonseca Tutikian e prof. Uziel Cavalcanti de Medeiros Quinino, os quais são fontes de inspiração para mim, pela orientação, pelo conhecimento, pela dedicação e pela amizade.

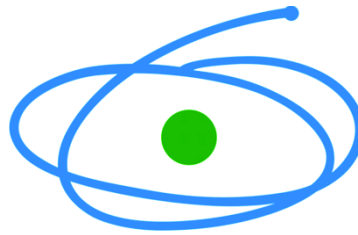
A todos os integrantes do itt Performance, especialmente à Bianca, Letícia, Maira, Nataly, Camila e ao Pedro, Crystian e Rodrigo Périco, pela ajuda nas moldagens e nos ensaios de caracterização. O ambiente de trabalho foi sempre leve e prazeroso com vocês.

Agradeço aos laboratoristas Júlio, David, Maurício, Thiago, André e Ingrid pelo apoio, auxílio e compreensão nos dias de concretagem e nos restantes das atividades realizadas no Laboratório de Materiais de Construção (LMC). Aproveito e agradeço ao prof. Cláudio Kazmierczak por disponibilizar alguns dos equipamentos, que foram imprescindíveis para a realização dos ensaios, sem eles não seria possível executar tal pesquisa.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos, fornecendo o financiamento integral do meu mestrado.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma forma na pesquisa. Muito obrigado!

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



C A P E S



RESUMO

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 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo.

Concretos com tecnologia avançada tornam-se cada vez mais comuns na indústria da construção civil. O desenvolvimento de produtos minerais e químicos fomenta a geração desses compósitos, possibilitando a inserção de insumos com desempenhos mecânicos melhorados. Todavia, mesmo com inúmeras vantagens, os novos concretos ainda se encontram suscetíveis à incidência de fissuras causadas pela retração. Sendo uma característica inerente às matrizes cimentícias, a retração, quando restringida, pode gerar manifestações patológicas, que prejudiquem a durabilidade da estrutura. Estudos vêm sendo realizados com enfoque na mitigação dessas anomalias, utilizando reforços primários e secundários dentro da matriz cimentícia. Como alternativa, utilizando as fibras como reforços é possível garantir alterações nos comportamentos mecânicos da mistura, a exemplo da resistência à tração, fator de tenacidade, capacidade de deformação e controle de fissuração. Com isso, nessa pesquisa foram empregadas, de maneira isolada e híbrida, microfibras poliméricas em uma matriz cimentícia. As microfibras eram constituídas por polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL). Para tanto, avaliou-se o fenômeno da retração por secagem dos compósitos por meio do ensaio de anel restringido, resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e tenacidade. Conjuntamente, investigou-se a microestrutura dos compósitos, utilizando o ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a fim de identificar a zona de interface entre o reforço e a matriz cimentícia, assim como a integridade física do reforço no concreto. Os compósitos com microfibras apresentaram maior retração por secagem, quando comparados à matriz referência, chegando a deformações superiores a 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Todas as misturas atingiram alto potencial de fissuração, sendo as amostras contendo microfibras de PP e PVA, as quais obtiveram a formação da fissura mais tardiamente (14 dias). Com relação à resistência à compressão axial e tração na flexão, a inserção de microfibras poliméricas promoveu a redução dos valores em relação à matriz referência. Todavia, o uso de microfibras de PVA não promoveu a queda de resistência à tração na flexão da matriz. Já o fator de tenacidade das misturas com fibras foi superior em relação ao concreto referência, ampliando em até 38 vezes os resultados. Verificou-se que a zona de interface formada pelas microfibras de PVA foi menor, quando comparada às demais opções, o que comprovou os bons resultados proporcionados pelo reforço. Também foi possível observar que as microfibras recicladas de poliéster foram agredidas em meio alcalino, diferentemente das demais.

Palavras-chave: Retração por secagem; Concreto reforçado com microfibras; Potencial de fissuração.

ABSTRACT

EHRENBRING, Hinoel Zamis. **Behavior of reinforced concretes with polypropylene (PP), polyvinyl alcohol (PVA) and recycled polyester (POL) microfibers in relation to restricted drying retraction and mechanical properties**. São Leopoldo, 2017. 165 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) -- Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

Concretes with advanced technology become increasingly common in the construction industry. The development of mineral and chemical products encourages the generation of these composites, allowing the insertion of inputs with improved mechanical performances. However, even with numerous advantages, the new concretes are still susceptible to the incidence of cracks caused by shrinkage. As an inherent characteristic of cementitious matrices, shrinkage, when restricted, can impair the quality of the structure and, as a result, generate pathological manifestations. Studies have been carried out focusing on the mitigation of these anomalies, using primary and secondary reinforcements within the cementitious matrix. As an alternative, the fibrous reinforcements guarantee changes in the mechanical behavior of the mixture, such as tensile strength, tenacity factor, deformation capacity and cracking control. Thus, in this research, isolated and hybrid polymer microfibers were used in a reference cementitious matrix. The filaments consisted of polypropylene (PP), polyvinyl alcohol (PVA) and recycled polyester microfibers (POL). For this, the phenomenon of the drying shrinkage of the composites was evaluated by means of the restricted ring test, axial compression strength, flexural tensile strength, modulus of elasticity and toughness. The microstructure of the composites was investigated using the scanning electron microscopy (SEM), in order to identify the interface zone between the reinforcement and the cementitious matrix, as well as the physical integrity of the reinforcement in the concrete. The composites with microfibers presented greater drying shrinkage, when compared to the reference matrix, reaching deformations of more than 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. All the blends reached a high cracking potential, with the samples containing PP and PVA microfibers which obtained cracking formation later (14 days). With respect to the compressive strength, the insertion of polymer microfibers significantly decreased the values in relation to the reference matrix. The toughness factor of the bundled mixtures was superior in relation to the reference concrete, increasing up to 38 times the results. On the other hand, the tensile strength in the flexion decreased values with the use of the filamentary reinforcements, except for the mixture with PVA microfibres. It was verified that the interface zone formed by the PVA microfibers was smaller, when compared to the other options, which proved the good results provided by the reinforcement. It was also possible to observe that recycled polyester microfibers were attacked in alkaline solution, unlike the others.

Key-words: Drying shrinkage; Concrete reinforced with fibers; Potential cracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fissuração devido à retração por secagem em materiais compósitos.....	32
Figura 2 – Fibras para adição em concretos.....	33
Figura 3 – Ilustração evidenciando as diferentes fases do concreto	37
Figura 4 - Relação entre retração relativa e volume de pasta de cimento.....	40
Figura 5 - Influência do teor de agregado e relação água/cimento na retração por secagem ...	41
Figura 6 - Relações entre a perda de água (em massa) e a retração por secagem	43
Figura 7 – Influência da perda de água em função da retração por secagem	44
Figura 8 – Formação de grumos de fibras de aço devido a mistura incorreta do compósito....	47
Figura 9 – Diagrama tensão vs deformação de concretos com variação de teores de fibras ...	48
Figura 10 – Classificação geométrica das fibras de aço	51
Figura 11 – Interface entre fibras de aço e matrizes cimentícias.....	54
Figura 12 – Distribuição de tensões na zona de interface entre a fibra e a matriz cimentícia..	55
Figura 13 – Fibras de aço com diferentes conformações superficiais	56
Figura 14 – Interação química entre fibras de PVA e matrizes cimentícias.....	56
Figura 15 – Fibras poliméricas de diferentes tipos	57
Figura 16 – Efeito da hibridização de fibras em matrizes cimentícias	60
Figura 17 – Instrumentação de retração restringida pelo método de placas	62
Figura 18 – Retração por secagem restringida em concretos pelo método de anel	63
Figura 19 – Deformação perimetral do anel e criação da primeira fissura na amostra	64
Figura 20 – Tratamento superficial da amostra com o uso de parafina líquida.....	65
Figura 21 – Fluxograma do programa experimental da pesquisa.....	68
Figura 22 – Composição granulométrica da areia final.....	72
Figura 23 – Curva granulométrica do agregado graúdo	73
Figura 24 – Microfibras poliméricas utilizadas para a confecção dos compósitos.....	74
Figura 25 – Conformação superficial de cada microfibra	74
Figura 26 – Procedimento de ensaio de abatimento nos compósitos estudados.....	79
Figura 27 – Especificações dos equipamentos para o ensaio de VeBe.....	80
Figura 28 – Montagem do sistema de fôrmas para a confecção dos anéis de concreto.....	80
Figura 29 – Dimensões dos moldes para ensaio de anel.....	81
Figura 30 – Procedimento de moldagem das amostras para o ensaio de retração restringida..	82
Figura 31 – Moldes para confecção das amostras prismáticas	83
Figura 32 – Representação esquemática para cálculo do módulo de elasticidade.....	84

Figura 33 – Esquema utilizado para realização do ensaio de tração na flexão.....	85
Figura 34 – Determinação do fator de tenacidade pelo gráfico carga vs deflexão	85
Figura 35 – Extensômetro utilizado na pesquisa (KYOWA KFG-30-120-C1-11)	86
Figura 36 – Equipamento de aquisição de dados utilizado na pesquisa	87
Figura 37 – Instrumentação completa do sistema de aquisição de dados.....	87
Figura 38 – Procedimento de colagem dos extensômetros	88
Figura 39 – Processo de corte das seções analisadas	89
Figura 40 – Processo de quantificação do teor de agregados graúdos nas misturas analisadas	90
Figura 41 – Instrumentação aplicada para a caracterização dos compósitos e fibras	90
Figura 42 – Processo de criofratura nos concretos analisados.....	91
Figura 43 – Resultados do ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone nos concretos analisados	94
Figura 44 – Correlação entre os ensaios realizados no estado fresco (etapa 1).....	96
Figura 45 – Resistência à compressão potencial axial das misturas em diferentes idades	99
Figura 46 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos compósitos nas condições de cura C1 e C2	102
Figura 47 – Vazios de concretagem devido a dificuldade de adensamento do compósito com fibras de POL	104
Figura 48 – Ruptura dos concretos após a submissão ao ensaio de tração na flexão	105
Figura 49 – Curvas carga vs deflexão obtidas após o ensaio de tenacidade dos compósitos simples	106
Figura 50 – Fator de tenacidade dos concretos avaliados.....	107
Figura 51 – Gráficos da intensidade da retração por secagem em cada mistura (etapa 1)	108
Figura 52 – Curvas da retração por secagem média das amostras analisadas na etapa 1	112
Figura 53 – Acúmulo de microfibras recicladas de POL na seção transversal do anel	113
Figura 54 – Amostras dos concretos após término do ensaio de retração pelo método do anel	114
Figura 55 – Seção tangencial dos concretos	115
Figura 56 – Resultados do ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone nos concretos analisados	120
Figura 57 – Correlação entre os ensaios realizados no estado fresco (Etapa 2)	121
Figura 58 – Resistência à compressão axial das misturas na etapa 2 em diferentes idades ...	123
Figura 59 – Módulo de elasticidade potencial do concreto referência e os reforçados com fibras híbridas.....	126

Figura 60 – Ruptura dos concretos após a submissão ao ensaio de tração na flexão	128
Figura 61 – Distribuição e arrancamento das fibras nas matrizes	129
Figura 62 – Distribuição das microfibras de PVA e PP na matriz cimentícia.....	130
Figura 63 – Curva carga vs deflexão obtidas após o ensaio de tenacidade dos compósitos híbridos	130
Figura 64 – Fator de tenacidade dos concretos avaliados.....	132
Figura 65 – Intensidade da retração por secagem em cada mistura (etapa 2).....	133
Figura 66 – Curvas da retração por secagem média das amostras analisadas na etapa 2	137
Figura 67 – Distribuição das microfibras de PP e PVA na matriz cimentícia.....	139
Figura 68 – Amostras dos concretos após término do ensaio de retração pelo método do anel	140
Figura 69 – Seção longitudinal dos concretos	141
Figura 70 – Interação dos reforços com a matriz cimentícia	144
Figura 71 - Interface entre a microfibra de PVA e a matriz cimentícia.....	145
Figura 72 – Pontos de interação entre a microfibra de PVA e a matriz cimentícia.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização mecânica e física de fibras compostas por diferentes materiais	50
Tabela 2 – Programa experimental para caracterização mecânica dos compósitos.....	69
Tabela 3 – Composição química do cimento	70
Tabela 4 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado	70
Tabela 5 – Composição granulométrica dos agregados miúdos.....	71
Tabela 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo.....	73
Tabela 7 – Propriedades das microfibras estudadas	75
Tabela 8 – Composição química do aditivo superplastificante para concreto	76
Tabela 9 – Proporção dos materiais para confecção do traço estipulado na pesquisa	77
Tabela 10 – Classificação de consistência pelo ensaio de VeBe	79
Tabela 11 – Classificação para o potencial de fissuração	88
Tabela 12 – Propriedades no estado fresco das matrizes estudadas na etapa 1	93
Tabela 13 – Classificação das misturas pré e pós adição do superplastificante	97
Tabela 14 – Resultados da resistência à compressão dos concretos analisados na etapa 1	98
Tabela 15 – Módulo de elasticidade dos concretos analisados na etapa 1.....	101
Tabela 16 – Resistência à tração na flexão do concreto referência e com fibras	103
Tabela 17 – Resultados da retração por secagem dos concretos (etapa 1)	110
Tabela 18 – Teor de agregado graúdo nas misturas estudadas na etapa 1	116
Tabela 19 – Teores de hibridização das microfibras em cada compósito.....	117
Tabela 20 – Propriedades das matrizes no estado fresco	118
Tabela 21 – Classificação das misturas pré e pós adição do superplastificante	119
Tabela 22 – Resultados da resistência à compressão dos concretos analisados na etapa 2	122
Tabela 23 – Módulo de elasticidade dos concretos analisados na etapa 2.....	125
Tabela 24 – Resistência à tração na flexão dos compósitos com fibras híbridas e o concreto referência.....	127
Tabela 25 – Resultados da retração e fissuras dos concretos com e sem microfibras poliméricas hibridizadas	135
Tabela 26 – Composição dos materiais na seção das misturas na etapa 2.....	142
Tabela 27 – Classificação do potencial de fissuração dos compósitos	142

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 184

Equação 2.....86

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AISI	American Iron and Steel Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	Bridge Standards
C-POL	Concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster
C-PVA+POL	Concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico e microfibras recicladas de poliéster
C-PP	Concreto reforçado com microfibras de polipropileno
C-PP+POL	Concreto reforçado com microfibras de polipropileno e recicladas de poliéster
C-PP+PVA	Concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico e polipropileno
C-PVA	Concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico
CAD	Concreto de alto desempenho
CPR	Concreto de pós reativos
CRF	Concreto reforçado com fibras
EN	European Standards
JSCE	Japan Society of Civil Engineers
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NM	Norma Mercosul
pH	Potencial hidrogeniônico
POL	Poliéster
PP	Polipropileno
PVA	Álcool Polivinílico

SUMÁRIO

1.1 Definição do tema.....	29
1.2 Justificativa.....	31
1.3 Objetivos	34
1.3.1 Objetivo geral	34
1.3.2 Objetivos específicos	35
1.4 Estrutura da pesquisa.....	35
1.5 Delimitações do trabalho.....	36
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1 Concreto.....	37
2.2 Retração e fissuração em concretos	39
2.2.1 Retração por secagem	42
2.3 Concreto reforçado com fibras (CRF)	45
2.3.1 Componente matricial.....	48
2.3.2 Elemento de reforço.....	49
2.3.3 Interação fibra-matriz	53
2.4 Particularidades de materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras sintéticas	57
2.5 Hibridização de fibras em matrizes cimentícias	58
2.5.1 Comportamento dos compósitos híbridos	59
2.6 Determinação experimental da retração por secagem restringida	61
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	67
3.1 Estratégia de pesquisa	67
3.2 Planejamento de ensaios.....	68
3.3 Seleção de materiais.....	69
3.3.1 Cimento	70
3.3.2 Agregado miúdo	71
3.3.3 Agregado graúdo	72
3.3.4 Fibras	73
3.3.5 Aditivo químico	76
3.4 Proporcionalamento dos materiais.....	76
3.4.1 Mistura.....	77
3.4.2 Trabalhabilidade	78

3.4.3 Moldagem, adensamento e cura	80
3.5 Seleção de ensaios.....	83
3.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.....	83
3.5.2 Ensaio de resistência à tração na flexão e fator de tenacidade	84
3.5.3 Ensaio de retração por secagem restringida	86
3.5.4 Quantificação do teor de agregado graúdo	89
3.5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	90
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	93
4.1 Etapa I.....	93
4.1.1 Propriedades no estado fresco (consistência)	93
4.1.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade	97
4.1.3 Resistência à tração na flexão e fator de tenacidade.....	103
4.1.4 Retração por secagem restringida.....	108
4.2 Etapa II	116
4.2.1 Propriedades no estado fresco (consistência)	118
4.2.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade	122
4.2.3 Resistência à tração na flexão e tenacidade.....	127
4.2.4 Retração por secagem restringida.....	133
4.3 Potencial de fissuração	142
4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	143
5 CONCLUSÕES.....	147
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	150
REFERÊNCIAS.....	151

INTRODUÇÃO

Produzido em larga escala, o concreto é o material artificial mais utilizado na construção civil nos dias de hoje. Esse material é de grande importância para o bom funcionamento dos diversos sistemas em que se aplica. (PEDROSO, 2009). Paralelamente ao desenvolvimento da construção civil, está a evolução da produção de diferentes tipos de concretos, a qual possibilita ampliar o campo de atuação dessas matrizes e proporcionar misturas com desempenhos melhorados. Em função disso, a cada dia, são criados novos compósitos capazes de resistir e durar mais do que concretos convencionais. (MEHTA; AÏTCIN, 1990; TUTIKIAN; HELENE, 2011). Segundo Christ (2014), a adição de diferentes componentes nas matrizes cimentícias pode ser feita através de minerais selecionados, aditivos químicos capazes de melhorar a trabalhabilidade e acelerar o processo de secagem, ou, até mesmo, a inserção de reforços estruturais particulados ou no formato de fibras, tais como a sílica ativa e as fibras metálicas.

Considerado um material não homogêneo e predominantemente frágil, o concreto pode ser caracterizado pela deficiência aos esforços de tração. (NEVILLE, 1997; DESNERCK et al., 2015). Para tanto, Hamoush et al. (2010) afirmam que se faz necessária a inserção de elementos de reforço, a fim de evitar a ruptura prematura, aumentar a capacidade de carga e proporcionar um acréscimo na vida útil do compósito. (TASK, 2000; GU et al., 2015). Diante dessa problemática, alternativas são elencadas para complementar as suas propriedades. Quinino (2015) aponta o concreto reforçado com fibras (CRF) como uma boa opção para suprir algumas deficiências da matriz, como: contenção de fissuras e aumento da energia de ruptura. Assim, o CRF pode trazer eficiência e economia aos processos da construção civil, sendo uma alternativa promissora, como é defendido por Figueiredo (2011).

Segundo ACI 544.1R (2009), o concreto reforçado com fibras é um compósito formado a partir de uma matriz cimentícia, contendo cimento hidráulico, agregados graúdos e miúdos, reforçado com fibras naturais ou sintéticas. Conforme Balaguru e Shah (1992), com a adição desses materiais finos e alongados, vislumbra-se complementar as propriedades da matriz, atuando, principalmente, na melhoria do fator de tenacidade do compósito, ou seja, o aumento da energia de ruptura do material.

As fibras são utilizadas na construção civil há muito tempo. Os primeiros relatos feitos com aplicação desse material foram dos egípcios, há cerca de 5000 anos, em tijolos de barro. (FIGUEIREDO, 2011; TANESI; FIGUEIREDO, 1999). Inicialmente, utilizavam-se

fibras vegetais e animais em matrizes cerâmicas, objetivando favorecer as construções da época. (BENTUR; MINDESS, 2007).

Nos dias de hoje, o mercado de fibras para concreto aumentou o número de investidores, tornando o seu uso cada vez mais presente em obras. Para Mindess (1981), a adição de fibras em matrizes cimentícias traz uma série de benefícios ao compósito, tais como: ganho de tenacidade, ganho de resistência à tração, aumento da resistência à ruptura elástica, ao impacto e fadiga, controle de fissuras e de deformações decorrentes das solicitações. O concreto reforçado com fibras é amplamente utilizado na produção de túneis, tubos pluviais e pavimentos, por proporcionar velocidade de execução e capacidade mecânica superior aos concretos convencionais. (JAMERAN et al., 2015). Entretanto, as características alteradas nos compósitos variam a partir do material de reforço e sua geometria. (NEVILLE, 1997; OSTERTAG; BLUNT, 2010).

Comparando os compósitos com fibras ao concreto armado, uma das maiores vantagens do CRF é a possibilidade de redistribuição de esforços por todo material, proporcionando propriedades mais isotrópicas ao elemento. Para Quinino (2015), em virtude disso, as armaduras tradicionais, compostas por barras de aço, tem pouco poder de ação para controlar a fissuração, pois se posicionam de forma concentrada e, conseqüentemente, sua área de influência é reduzida. Assim, as fibras inseridas nos compósitos cimentícios possuem maior eficiência no combate a nucleação ou até mesmo propagação de fissuras.

As modificações promovidas nas características dos compósitos com adição de fibras ficam evidentes quando se relacionam as propriedades dos materiais separadamente. Porém, o ganho de desempenho nos parâmetros característicos da matriz só acontece quando a interação fibra-matriz é eficaz. (BERNARDI, 2003). Além desses, são listados outros fatores pertinentes às propriedades mecânicas do CRF, entre eles as dimensões e formatos da fibra, o material do reforço e os teores de adição. (QUININO, 2015).

Todavia, o uso de reforços não evita a ocorrência de alguns fenômenos característicos dos materiais cimentícios, sendo a retração um deles. Segundo Wittmann, Beltzung e Zhao (2009), a retração por secagem é a origem mais frequente na formação de fissuras em matrizes cimentícias e, se negligenciada, pode acarretar em sérios problemas. Considerado um aspecto inerente ao concreto, a retração, quando restringida, provoca o surgimento de fissuras ao longo da matriz e, mesmo que apresentem dimensões imperceptíveis, são responsáveis pela entrada de agentes agressivos que reduzem a durabilidade do sistema. Além desses fatores, as propriedades mecânicas do sistema são afetadas, diminuindo a capacidade do mesmo resistir aos esforços.

Para isso, fibras de baixo módulo de elasticidade mostram-se boas alternativas para correção dessas anomalias, visto que possuem elevada capacidade de deformação, superior a 10%, como polipropileno e poliéster, propiciando maior flexibilidade à matriz nas idades iniciais. (BERNARDI, 2003; BENTUR; MINDESS, 2007).

Fibras poliméricas são exemplos de elementos com baixo módulo de elasticidade, podendo ser listados o poliéster, nylon, polietileno, polipropileno e álcool polivinílico (PVA). O avanço tecnológico dos materiais fez com que fossem investigadas e descobertas diferentes tipos de fibras para aplicações diversas. Os reforços constituídos por álcool polivinílico (PVA) já mostravam grande potencial de inserção em concretos, conforme Akers et al. (1989). Porém, sua utilização ainda não é unânime na construção civil, mesmo assim, fibras em PVA são ótimas opções quanto à contenção de microfissuras em matrizes cimentícias, de acordo com as pesquisas de Juarez et al. (2015) e Mazzoli et al. (2015). As de poliéster também vêm alcançando bons resultados. Já as fibras de polipropileno (PP) são amplamente utilizadas no mercado da construção civil e também mostram bom comportamento na mitigação de fissuras por retração.

Tanesi e Figueiredo (1999) apontam grande eficiência das fibras de baixo módulo de elasticidade no combate a formação de fissuras por retração com teores de adição na faixa de 0,10 a 0,30%, em volume. Neste contexto, enquadram-se as fibras naturais, vegetais e poliméricas. Além desses pesquisadores, foi possível identificar teores de fibras de 0,30 a 0,80% em trabalhos como o de Juarez et al. (2015), Mazzoli et al. (2015) e Sun e Wu (2008).

Dessa forma, com o intuito de desenvolver um CRF de propriedades mecânicas melhoradas, o presente trabalho avaliou o comportamento do concreto com a incorporação de diferentes fibras frente a retração por secagem, com o teor de adição fixado em 0,50% do volume de materiais secos.

1.1 Definição do tema

A retração é um fenômeno inerente às matrizes cimentícias. Estudos sobre sua influência frente os compósitos à base de cimento iniciaram no século XX, com o pesquisador Le Chatelier. O pesquisador tomou posse dos estudos relacionados a essas variações volumétricas, os quais surgiram a partir de registros envolvendo as propriedades do cimento e seu processo de autodessecação. Em meio às análises, Le Chatelier constatou que havia diferença entre o volume absoluto e o volume aparente da pasta de cimento. (JENSEN; HANSEN, 2001 apud SENISSE, 2010).

Baseando-se nas teorias promissoras de Le Chatelier, na década de 40 outros pesquisadores começaram a intensificar os estudos voltados ao fenômeno da retração. Dentre os inúmeros projetos iniciados nessa época, foi possível distinguir diferentes tipos de retração, como a plástica, por secagem, por carbonatação, autógena e por fluência.

A partir do ano de 1948, a retração por secagem teve como investigação pioneira o trabalho desenvolvido pelos pesquisadores Powers e Brownyard. (SENISSE, 2010). A pesquisa deteve-se em demonstrar matematicamente a possibilidade de referir cálculos aos compósitos já endurecidos. O avanço desse estudo fez com que fosse possível mensurar o fenômeno da retração, tendo os cálculos como base para outras deduções matemáticas, como determinação da idade de fissuração do concreto. (DONG et al., 2014).

A fundamentação da retração por secagem permitiu que essa fosse fragmentada em diversas linhas de pesquisa, como a de Coppeland e Bragg, que propuseram, no ano de 1955, um método para medição da autodessecação do concreto. Com a conceituação do fenômeno, pode-se verificar as principais influências e medidas de combate, evitando os efeitos da retração. Desde então, os trabalhos intensificaram-se, como o de Ababneh (2001) e Boghossian e Wegner (2008), que estudaram a eficiência da geometria das fibras no controle de fissuras por retração. Já Bisschop e Van Mier (2003) identificaram a interferência do tipo, proporção e dimensão dos agregados no concreto em função da retração. Piasta e Sikora (2015) analisaram a retração com o uso de aditivos incorporadores de ar em concretos.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a retração ocorre diferentemente em matrizes cimentícias. Com isso, o processo de dosagem pode potencializar a retração do compósito. Neville (1997) ressalta que, em um mesmo concreto, o aumento na quantidade de água presente na pasta de cimento relaciona-se diretamente com o aumento da retração da matriz. O autor esclarece a importância do tipo de cimento utilizado, módulo de elasticidade do agregado, adição mineral na matriz e o ambiente de aplicação do material.

Quando a retração dos compósitos é restringida há a potencialização na formação de fissuras ao longo de sua matriz, devido à criação de tensões internas de tração. Para Carmona Filho e Carmona (2013), a presença de fissuras é um fator que agrava a funcionalidade de qualquer sistema, já que o mesmo encontra-se vulnerável e sujeito aos ataques de agentes externos, como é o caso do dióxido de carbono e íons cloretos, os quais estão dispersos livremente na atmosfera, dependendo da região.

O combate ao surgimento dessas manifestações patológicas pode ser feito de diversas maneiras. Como já é de conhecimento comum, as fibras tornam-se opções relevantes no combate a mitigação de fissuras, tanto em concretos, quanto em argamassas. Algumas

pesquisas fomentam a aplicação desses reforços em concretos, como o estudo feito por Ostertag e Blunt (2010) em relação a hibridização de reforços, utilizando fibras de aço e de PVA. Já Senisse (2010) aprofundou-se em compósitos com microfibras de polipropileno, com a finalidade de controlar os impactos da retração por secagem. Para o mesmo fim, Ehrenbring (2015), atentou-se em evitar a propagação de fissuras com o uso de reforços reciclados de poliéster.

A escolha do tipo de fibra a ser aplicada na pesquisa foi impulsionada pelo potencial que cada material apresenta. Segundo Juarez et al. (2015), as microfibras de PVA mostram ser excelentes reforços para as idades iniciais do concreto, em razão da sua ligação química com a matriz cimentícia. Já as fibras de polipropileno figuram como os principais reforços poliméricos aplicados em CRF no Brasil. Por fim, as microfibras recicladas de poliéster revelaram-se boas alternativas para contenção de fissuras em concretos, conforme pesquisa realizada por Ehrenbring (2015).

1.2 Justificativa

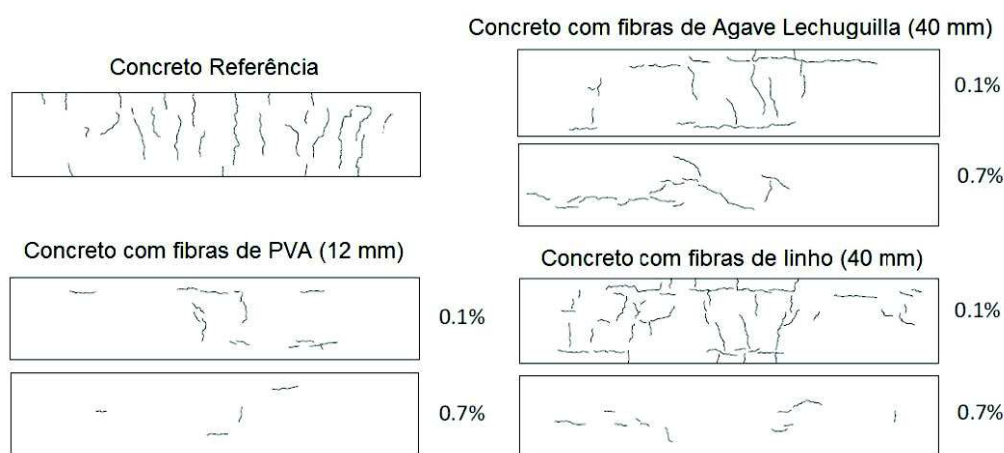
O CRF é um compósito que vem alcançando patamares interessantes em linhas de pesquisa e na indústria da construção civil, sendo aplicado em peças pré-fabricadas, como tubos pluviais, sistema de contenção, como túneis e taludes, e também em elementos estruturais, como os pisos industriais. O processo de exploração de novos reforços e novas composições de misturas faz com que esses compósitos estejam em constante desenvolvimento. (FIGUEIREDO, 2011). Suas propriedades são dependentes do tipo de fibras que as constituem, podendo impactar expressivamente sobre suas características mecânicas com simples variáveis de adição. (MINDESS, 1981; NAAMAN, 1985).

Fundamentada nas propriedades já conhecidas das fibras, sua aplicação volta-se, basicamente, na contenção de fissuras em elementos constituídos por cimento. (BENTUR; MINDESS, 2007). A formação dessas fissuras pode ser ocasionada por inúmeros fatores, como a variação volumétrica do material. (SENISSE, 2015).

No caso de peças com grande área superficial e com pequenas alturas, como é o caso de lajes, pavimentos e pisos industriais, o fenômeno da retração acontece com mais frequência e intensidade. (CHODOUNSKY; VIECILI, 2007). Em decorrência da alta relação área superficial/altura, os efeitos de retração restringida e, por conseguinte, nucleação de fissuras, é de grande importância. (SILVA, 2011).

Para Kurdowski (2014), muito em função da acelerada perda de umidade em elementos planos com grandes áreas superficiais, há o aumento do potencial de fissuração desses elementos e as fibras podem amenizar as consequências. A inserção de fibras como reforço pode atuar de maneira eficiente na contenção de fissuras e o desempenho do compósito está associado ao teor, tipo e geometria da fibra. Nota-se na Figura 1 que a adição de microfibras de PVA melhora expressivamente a taxa de fissuras do concreto referência. A superioridade dessa fibra é notada em relação as demais, mesmo aplicando teores de adição equivalentes.

Figura 1 – Fissuração devido à retração por secagem em materiais compósitos



Fonte: Juarez et al. (2015, p. 167).

Aprofundando cada vez mais os conhecimentos sobre as propriedades dos concretos reforçados com fibras, pode-se executar elementos de grandes volumes sem que a retração e fissuração sejam um problema. (BANGI; Horiguchi, 2012).

Com uma extensa gama de materiais dispostos ao uso em matrizes geram-se um novo material compósito. Considerando que existem diversos tipos de fibras, torna-se inevitável obter resultados dessemelhantes. (MAZZOLI et al., 2015). Para o bom desempenho de uma matriz, sua dosagem deve ser feita estrategicamente, conhecendo os materiais que a compõem. (LI et al., 2004).

No caso das microfibras sintéticas a base de polímeros, pode-se vincular sua aplicação para tornar a matriz mais resistente à ocorrência da microfissuração, diminuindo a possível propagação destas falhas e aumentando a resistência do material no estágio de pré-fissuração. (HAMOUSH; ABU-LEBDEH; CUMMINS, 2010; OSTERTAG; BLUNT, 2010). Devido ao pequeno comprimento e a sua espessura limitada, as microfibras possuem grande eficiência nas ações microestruturais. Além disso, o baixo módulo de elasticidade das fibras poliméricas, muito inferior ao do concreto, possibilita que intervenham apenas nas idades

inicias da mistura, etapa na qual se formam a maioria das microfissuras. (SILVA, 2007). A Figura 2 ilustra algumas fibras poliméricas utilizadas em pesquisas, sendo polipropileno e PVA as de maior fomento, e as recicladas de poliéster com baixa inclusão nas pesquisas, mas que apresentam bons resultados.

Figura 2 – Fibras para adição em concretos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (A) fibras de polipropileno; (B) fibras de PVA; (C) fibras recicladas de poliéster.

Com base em referências bibliográficas, nota-se a extrema importância de realizarem-se estudos sobre novas composições fibrosas com o intuito de consolidarem-se no mercado consumidor. Cada material reagirá de forma diferente em cada mistura, podendo partir desde fibras naturais até fibras sintéticas.

Em meio as diversas fibras disponíveis no mercado e os com potencial de comercialização, essa pesquisa avaliou as propriedades das misturas com microfibras de álcool polivinílico (PVA), de polipropileno (PP) e recicladas de poliéster (POL). Foram realizados ensaios voltados ao comportamento das misturas com fibras frente ao controle de fissuras devido a retração por secagem.

Além dos parâmetros isolados de cada material, a hibridização de diferentes fibras na mesma mistura também se torna uma medida proveitosa para avaliação das propriedades dos concretos, podendo associar as fibras de forma binária, as quais complementam a deficiência uma a outra, atuando em diferentes estágios.

Ao determinar funções diferentes das fibras, pesquisadores já começam a discutir a associação desses reforços, formando o termo que hoje é conhecido como misturas híbridas. (YIN et al., 2015). Os efeitos de combinação, a investigação dos comportamentos, geometria das fibras, suas propriedades mecânicas, compatibilização dimensional para com os agregados e os parâmetros de aderência com a matriz são os principais fatores investigados dentro da temática de hibridização. (QUININO, 2015)

Em âmbito internacional, muito já se estudou sobre os efeitos da adição de fibras nas variações volumétricas de matrizes cimentícias e suas consequências. No caso da retração por secagem, alguns autores desenvolvem suas pesquisas em torno da diminuição do potencial de fissuração do concreto com o uso de fibras. No Brasil, o estudo da mitigação de fissuras com o uso desse reforço ainda é crescente como mostrou Senisse (2010). Mesmo assim, atualmente, em território brasileiro, são desenvolvidos poucos estudos frente o assunto, tendo como exemplo Souza (2014). Em âmbito internacional, pode-se destacar o desenvolvimento das pesquisas de Schwartzentruber et al. (2004), Juarez et al. (2015) e Mazzoli et al. (2015). Assim, é possível perceber o potencial de estudo dos compósitos com fibras a fim de diminuir a fissuração por retração.

Mesmo havendo pesquisas que ilustram o desempenho satisfatório das fibras em concretos para a contenção de fissuras, a temática ainda necessita ser mais explorada. As variações dos teores de adição e até a hibridização de microfibras vêm a somar no cenário mundial de compósitos com fibras. Nesse sentido, o presente estudo explora as propriedades de concretos reforçados com microfibras poliméricas virgens e recicladas para diminuição potencial de fissuração da matriz referência. É aplicado teor de adição equivalente a 0,50% do volume e também hibridizando os reforços para avaliar a influência de cada um nas propriedades físicas, mecânicas do compósito e interferência na microestrutura da matriz e do próprio material de reforço. Para isso, foram estudadas as microfibras poliméricas compostas por polipropileno, PVA e recicladas de poliéster.

1.3 Objetivos

Neste item são descritos os objetivos do trabalho, sendo separados em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar o comportamento de concretos reforçados com microfibras poliméricas frente ao seu potencial de fissuração devido à retração por secagem restringida.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) comparar a idade da primeira fissura em cada uma das misturas por meio do ensaio de retração restringida;
- b) analisar comparativamente a deformação máxima de retração por secagem de cada mistura ensaiada;
- c) identificar o tipo de mistura com maior eficiência à contenção de fissuras, através do ensaio de retração por secagem restringida;
- d) avaliar as propriedades mecânicas de cada uma das misturas, incluindo ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade;
- e) verificação da microestrutura dos compósitos, da zona de interface de cada microfibras com a matriz cimentícia e analisar o estado de conservação dos reforços quando inseridos no concreto.

1.4 Estrutura da pesquisa

A pesquisa está estruturada em 5 capítulos, os quais abordam os assuntos pertinentes para o desenvolvimento deste trabalho. Os itens a seguir retratam a divisão dos capítulos, assim como suas particularidades:

- O primeiro capítulo objetiva tratar a introdução sobre o concreto reforçado com fibras, relacionando à retração por secagem restringida. Além desta abordagem, esta parte inicial expressa os objetivos, a justificativa e as delimitações do trabalho;
- O segundo capítulo apresenta a contextualização sobre o tema da pesquisa. Neste capítulo, denominado como revisão bibliográfica, desenvolveram-se e aprofundaram-se os conceitos necessários para a execução do trabalho, contextualizando a eficiência dos compósitos com fibras na mitigação das fissuras;
- No terceiro capítulo foram descritos os métodos de pesquisa aplicados no estudo para a obtenção dos resultados. A instrumentação de ensaios, equipamentos e normas foram descritas nesta etapa. As análises feitas nesta etapa foram norteadas por normas nacionais e internacionais;
- No quarto capítulo está a apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos, através dos programas experimentais adotados;

- O quinto capítulo remete às conclusões alcançadas com o desenvolvimento do estudo, através das análises feitas sobre os resultados encontrados. Por fim, foram levantados trabalhos futuros como sugestões.

1.5 Delimitações do trabalho

Para atingir os objetivos do trabalho formulou-se um roteiro, no qual se delimitam os contornos desse estudo.

Planejou-se utilizar cimento Portland CP V-ARI RS por ser um dos aglomerantes com maior pureza disponibilizados ao mercado e também pela sua velocidade de hidratação. Essas propriedades, aliadas ao objetivo da pesquisa, proporcionam magnitude na retração da matriz cimentícia, quando comparadas a outros tipos de aglomerantes.

No controle a propagação de fissuras por retração por secagem de concretos, adotou-se a inserção de microfibras sintéticas constituídas por PVA, polipropileno e recicladas de poliéster. Esses materiais foram adicionados em teores de 0,50% em relação ao volume de concreto produzido. Além das aplicações individuais, trabalhou-se com hibridização binária de fibras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

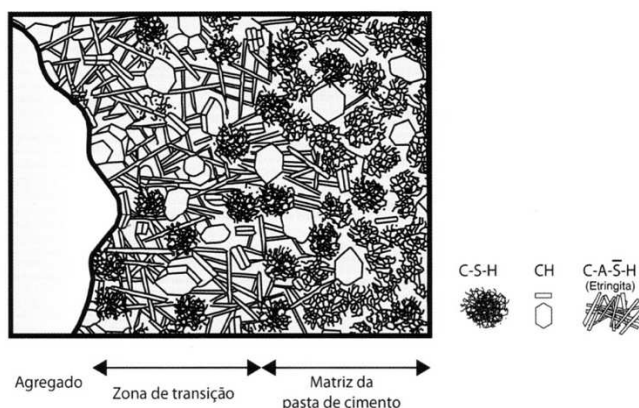
Esse capítulo aborda os conceitos pertinentes necessários para a compreensão do tema escolhido para a pesquisa.

2.1 Concreto

Não há questionamentos sobre o potencial do concreto frente à construção civil atual. Segundo Brunauer e Copeland (1964), na década de 50 já era expressiva a quantidade de concreto consumido em edificações e obras de arte de engenharia. Tais pesquisadores afirmaram que, nessa época, o uso do concreto, como material estrutural, já superava o aço. Na atualidade o panorama não se alterou, e os desenvolvimentos decorrentes da indústria da construção civil e da química do cimento propiciaram ao material ganhos de produção, chegando à marca histórica de 19 bilhões de toneladas métricas no ano de 2013. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto é composto por cimento Portland é uma mistura formada apartir da interação entre a pasta de cimento, os agregados e a zona de transição, conforme ilustra Figura 3. (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Em concretos, as fases de composição são determinantes no comportamento mecânico do mesmo. A zona de transição localizada entre os agregados e a pasta cimentícia torna-se o ponto frágil da mistura e o local da nucleação de fissuras, possibilitando a propagação da abertura devido o aumento de esforços. (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Figura 3 – Ilustração evidenciando as diferentes fases do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 198).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o concreto é um material composto por outros componentes, os quais interagem através de reações químicas e físicas. A dosagem dessa mistura parte da composição dos seus materiais constituintes, sendo eles o cimento, adições, agregados miúdos, agregados graúdos, água e aditivos químicos. (NEVILLE, 2013). O seu processo de fabricação não apresenta grandes demandas tecnológicas, divergindo de outros materiais que, necessariamente, provêm de processamentos de produção mais elaborados, como é o caso do aço. (NEVILLE, 1997).

Conforme mencionado anteriormente, o fato da matriz ser seccionada em 3 diferentes fases torna-a ineficiente aos esforços de tração gerados. Sem o uso de reforços, é inevitável a formação de fissura que, por sua vez, podem ser propagadas facilmente. Todavia, mesmo sendo um dos materiais estruturais mais recentes aplicados para edificações, o concreto pode ser considerado como uma das descobertas mais revolucionárias da história humana. (HELENE; ANDRADE, 2010)

Por outro lado, a mistura, além de sua heterogeneidade, possui grande chance de ser confeccionada indevidamente, podendo desvincular-se dos princípios de dosagem estipulados desde o início. (HELENE; ANDRADE, 2010). Mesmo sendo um material facilmente confeccionado, os processos de dosagem e mistura dessa matriz geram anomalias irreversíveis. Caso as tomadas de decisão sejam feitas erroneamente, suas consequências promovem a redução de resistência, diminuição da durabilidade, aumento no potencial de retração e fissuração.

Independentemente de mecerer destaque como um dos materiais mais atrativos e utilizados na construção civil, é possível constatar algumas limitações de uso e variabilidade de comportamentos dos concretos. (QUININO, 2015). Dada a fragilidade do material, destacam-se algumas características inerentes às matrizes à base de cimento, tais como: retração, variações volumétricas sob condições térmicas, baixa capacidade de deformação e resistência à compressão. (TUTIKIAN; HELENE, 2011). Diante dessas variáveis, adotam-se medidas incorporativas, aplicando outras matérias primas à mistura, a fim de aprimorar as propriedades do compósito, a exemplo da fragilidade e propagação de fissuras. (RAMLI; DAWOOD, 2011).

Todavia, por mais que adotem medidas incorporativas em concretos a fim de melhorar o seu comportamento mecânico, não há como evitar alguns fenômenos físicos, como a retração. Dessa forma, são necessárias escolhas que minimizem o potencial de retração e evitem as possíveis consequências do fenômeno.

2.2 Retração e fissuração em concretos

A retração é um fenômeno inerente às matrizes cimentícias, caracterizada pela variação volumétrica da pasta e está relacionada aos processos físicos e químicos que ocorrem internamente no material. (SENISSE, 2015). Mehta e Monteiro (2014) justificam essa ação tanto por fatores internos, como a hidratação do cimento, quanto por ações externas, como a perda de água para o meio.

A fase inicial de hidratação é expressa pelo processo de enrijecimento do material, garantindo a perda de consistência da pasta e caracterizando-se pela diminuição gradual da água concentrada na mistura. O consumo da água, além dos processos de hidratação, ocorre pela adsorção superficial, absorção dos agregados contidos na mistura e pelo fenômeno da evaporação promovido através da exsudação. (NEVILLE, 2013).

Para Holt (2001) e Nunes e Figueiredo (2007), a variação volumétrica desses compósitos cimentícios ocorre mais intensamente nas fases iniciais. Todavia, não é tratada com importância, uma vez que a mistura ainda se encontra no estado fluido e tem capacidade de absorver as tensões, corrigindo imediatamente as anomalias formadas.

Poucas horas após o lançamento, à medida em que ocorre a hidratação do cimento, perde-se a flexibilidade da mistura e o fenômeno da retração torna-se mais relevante. (MOKAREM, 2002; PIASTA; SIKORA, 2015). Para Sant et al. (2008), essa etapa é definida como a solidificação da pasta, passando do estado fluido para o sólido viscoelástico, ou seja, no momento em que a matriz cimentícia transforma-se em sólido poroso, entretanto não atinge plena resistência. (ALY et al., 2008; BENTZ; WEISS, 2008).

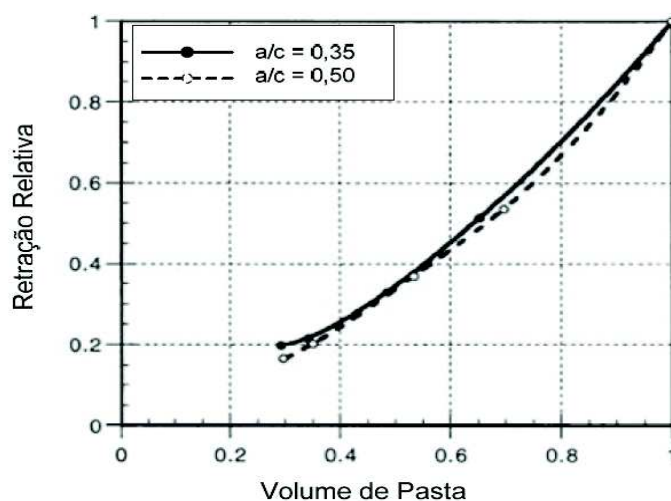
Em idades mais avançadas, quando o esqueleto do compósito está totalmente formado, caso não seja considerada a variação dimensional de misturas à base de cimento, podem ser ocasionadas manifestações patológicas, como a nucleação de fissuras. (MAZZOLI et al., 2015). Porém, Tanesi e Figueiredo (1999) afirmam que a fissuração por meio das mudanças de volume só ocorre quando estas estão restringidas.

Assim, Wittmann et al. (2009) e Carmona Filho e Carmona (2013) relacionam o fenômeno da retração como a origem mais frequente de fissuras em revestimentos argamassados ou elementos de concreto. Tal manifestação patológica é constantemente encontrada em edificações e pode acelerar a deterioração da estrutura, devido a fácil penetração de agentes agressivos. (ALY et al., 2008). Com o propósito de aumentar a durabilidade dos elementos, é imprescindível mitigar o aparecimento de fissuras pelas variações volumétricas.

Na maioria dos casos, a retração não é anulada, todavia existem maneiras de diminuí-la consideravelmente. Autores como Nunes e Figueiredo (2007) e Helene e Andrade (2010) salientam a importância na escolha dos materiais para a composição das matrizes.

A simultaneidade dos fatores integrados atua sobre a retração das matrizes. Conforme Mehta e Monteiro (2014), a principal fonte de deformações dos elementos de concreto está relacionada à umidade relativa da pasta de cimento hidratada. Bissonnette, Pierre e Piegeon (1999) comprovaram que existe relação direta entre o aumento do volume da pasta de cimento hidratada com o aumento da retração, como mostrado na Figura 4.

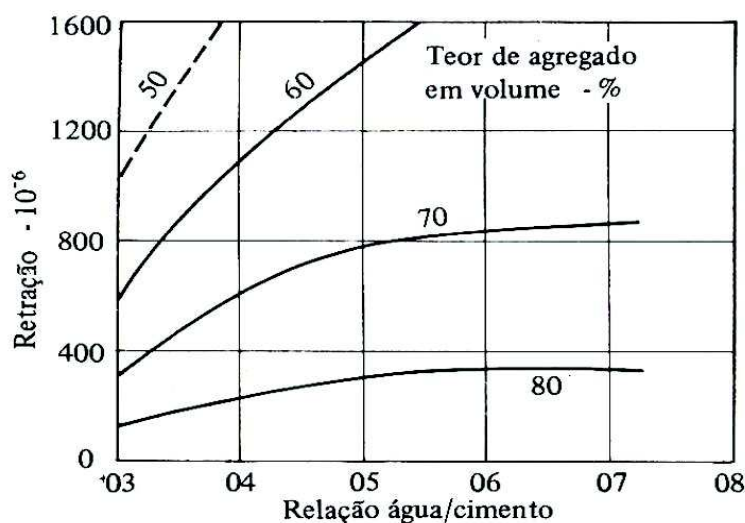
Figura 4 - Relação entre retração relativa e volume de pasta de cimento



Fonte: Bissonnette, Pierre e Piegeon (1999, p. 1660).

Embora a quantidade de água na mistura seja um fator potencializador da retração, Troxell (1958) enfatiza que as propriedades dos agregados também influem na retração dos compósitos cimentícios. Além da caracterização, o teor de agregado incorporado na mistura leva a mudanças de comportamento do compósito frente à retração por secagem, conforme Figura 5. (NEVILLE, 1997; ZHANG et al., 2013).

Figura 5 - Influência do teor de agregado e relação água/cimento na retração por secagem



Fonte: Odman (1968); adaptado por Neville (1997, p. 431).

Em concretos, o agregado tem uma forte influência na retração, já que a pasta de cimento tem módulo de elasticidade inferior ao do agregado, portanto mais flexível. (CORTAS et al., 2014; FATHIFAZL et al., 2011). Com isso, o agregado gráudo forma uma barreira, impedindo a deformação da pasta, o que acaba prejudicando a estabilidade do compósito, formando fissuras na zona de transição localizada entre a pasta e o agregado. Sendo assim, o mesmo influi diretamente no módulo de elasticidade do concreto e, conseqüentemente, intervem na retração da mistura. (SAITO et al., 1991; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A retração pode ser segmentada em diferentes etapas e maneiras de desenvolvimento. As variações volumétricas que ocorrem nas primeiras horas após a moldagem do concreto, ou seja, após o início da pega, constituem a retração plástica. (SULE; BREUGEL, 2004; SENISSE, 2015). Helene e Andrade (2010) reforçam a existência desse fenômeno apenas quando o concreto se encontra no estado viscoelástico, onde a perda da água para o meio é o fator agravante. Basicamente, a perda de água, nessa etapa, concentra-se com a ocorrência da exsudação e absorção dos materiais em contato com substratos. (NUNES; FIGUEIREDO, 2007).

Passada a fase inicial, ocorre a segunda etapa da retração, a qual atua sobre os compósitos cimentícios ao longo do tempo. Tal período instaura-se com o processo de pega finalizado, ocorrendo algumas horas após o início do processo de hidratação do cimento. (HOLT, 2001). Esse período tende a ser variável, pelo fato de depender dos materiais empregados na matriz e condições climáticas que a mesma será exposta.

Nesse intervalo acontecem outros tipos de retração, sendo uma delas a retração autógena.

A retração autógena, também denominada como autossecagem ou autodessecação, é mais presente em concretos de alto desempenho (CAD), pois sua relação água/cimento é baixa, limitando a hidratação do cimento. Esse tipo de fenômeno não apresenta transferência de umidade entre o meio externo e o material, originando-se através da contração da pasta de cimento durante a hidratação do aglomerante. (DANTAS, 1987; NUNES; FIGUEIREDO, 2007).

Assim como a retração autógena, a retração por carbonatação também se desenvolve ao longo do tempo. O fenômeno caracteriza-se pelo consumo de hidróxidos de cálcio localizados nos poros da pasta. O agente principal dessa ação é o dióxido de carbono que penetra no material por meio dos poros. Ou seja, a integridade do sistema relaciona-se com a sua porosidade e agressividade do ambiente em que se encontra. (NUNES; FIGUEIREDO, 2007).

Embora todos os tipos de retração citados tenham grande impacto na durabilidade das estruturas confeccionadas por concretos, o fenômeno da retração por secagem pode ser considerado o principal responsável pela deterioração das estruturas. Para Wittmann et al. (2009), é na retração por secagem que se origina a maior porcentagem de fissuras em comparação com os outros tipos de retração.

2.2.1 Retração por secagem

A retração por secagem é um fenômeno físico causado exclusivamente pela perda de água, levando a contração do concreto no seu estado endurecido. (KAUFMANN et al., 2004). A deficiência na dosagem de materiais, das especificações geométricas do sistema em projeto e execução são as principais razões para ocorrer a retração por secagem. Caso aconteçam, existem grandes chances de o compósito apresentar altas taxas de fissuração, diminuindo o desempenho do elemento. (WITTMANN et al., 2009).

Senisse (2015) aponta a formação de microfissuras através da retração da pasta de cimento. Em concretos, a nucleação destas pequenas aberturas acontece inicialmente nos poros da pasta, posteriormente a microfissura propaga-se e atinge a zona de transição dos agregados. (NEVILLE, 1997; BENTUR; MINDESS, 2007).

Segundo Granger et al. (1997), a retração por secagem é originada através do processo de secagem da matriz cimentícia, na qual ocorre a primeira grande mudança

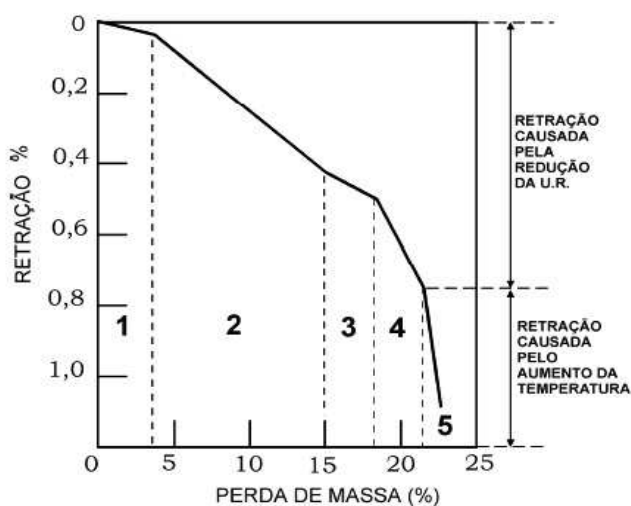
macroscópica do compósito. Os movimentos de umidade acontecem na pasta de cimento já durante o estágio de hidratação. Essas trocas de umidade atingem a quantidade de água presente na mistura, mesmo que após o período de viscoelasticidade. (NUNES; AGOPYAN, 1998).

Baseando-se em Callister Jr. e Rethwisch (2012), a perda de umidade dos materiais cimentícios acontece por múltiplos fatores, sendo que um deles diz respeito à hidratação do cimento. As reações de hidratação do cimento promovem a formação de produtos, como silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sendo que o volume desses produtos é inferior ao dos materiais não hidratados. (TAZAWA; MIYAZAWA, 1995; SENISSE, 2010).

Tratando-se dos concretos, quando se encontram no estado endurecido, já possuem capacidade de absorver as tensões de tração geradas pela retração. Nessa etapa, a volumetria do material é alterada, devido o seu gradiente de secagem. Além do gradiente de secagem, ainda ocorre a hidratação do cimento anidro e o transporte de líquidos e vapores de água para fora da matriz. (KAUFMANN; WINNEFELD; HESSELBARTH, 2004).

A Figura 6 mostra a variação na retração por secagem devido a velocidade na perda da água da mistura.

Figura 6 - Relações entre a perda de água (em massa) e a retração por secagem



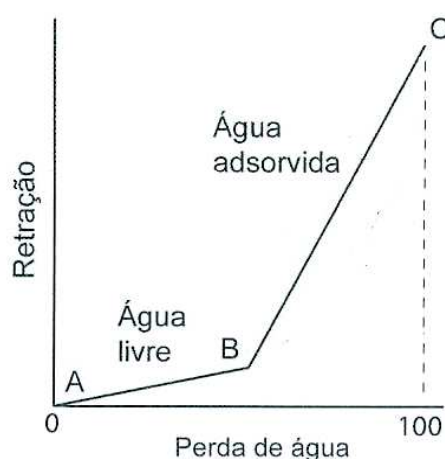
Fonte: Mindess e Young (1981, p. n.d.).

Mindess e Young (1981) dividem a perda de água do concreto em cinco domínios.

- Domínio 1 e 2: perda de água retida nos vazios capilares;
- Domínio 3: perda de água absorvida fisicamente aos cristais de C-S-H;
- Domínio 4: perda de água interlamelar;
- Domínio 5: perda de água quimicamente combinada.

Em função da umidade retida na pasta de cimento, classifica-se a dificuldade da sua remoção. A água consumida para a hidratação do cimento é chamada de adsorvida e situa-se na superfície dos sólidos da pasta sob forças originadas pelas pontes hidrogênio. Sua evasão é a principal responsável pela retração da pasta de cimento hidratada. Já a água livre apresenta-se na superfície dos elementos concretados e é facilmente removida pela ação do ambiente externo por meio da vaporização, as altas temperaturas e presença de vento. Sua influência não é tão significativa na retração por secagem quanto a perda da água adsorvida, conforme ilustra a Figura 7. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 7 – Influência da perda de água em função da retração por secagem



Fonte: Mehta e Monteiro (2014, p. 41); adaptado pelo autor.

Observa-se que a principal causa da retração por secagem é a água que se encontra retida nos vazios capilares e é utilizada para hidratação do cimento. Nesse caso, a pasta de cimento sofre com as perdas de umidade, já que é nela que ocorrem as trocas mais intensas entre o concreto e o ambiente. (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Neville (1997) comprovou que, quanto maior o teor de cimento, maior será a retração da pasta hidratada, pois ocorre o aumento na quantidade de material sujeito a retração.

Para Mehta e Monteiro (2014), em detrimento do refinamento dos poros da mistura, devido as partículas do cimento, o concreto passa a obter maior poro-pressão com a saída da água da pasta hidratada. A soma desses fatores tendencia o aumento da retração por secagem na matriz. (NEVILLE, 1997). Outro fator que afeta a magnitude da retração por secagem está relacionado com as dimensões do elemento. (WITTMANN et al., 2009).

As características quanto ao tamanho e o formato da estrutura devem ser analisadas, levando em consideração a relação entre a superfície exposta ao ambiente e o volume total do

elemento. (SENISSE, 2015). Os atributos geométricos podem facilitar a formação de caminhos preferenciais para a saída da água e, nesse contexto, fragilizar o material. (BISSCHOP; VAN MIER, 2002). A capacidade de o elemento sofrer o processo de secagem é muito maior quando sua relação superfície/volume encontra-se elevada, pois o caminho para a difusão da água é menor e, conseqüentemente, perde-se umidade mais facilmente. (HOLT, 2001).

Os agregados também podem interferir na retração por secagem dos compósitos cimentícios, pois há variações nos módulos de elasticidades entre os minerais que os constituem. (NEVILLE, 1997). Agregados com módulos mais elevados causam menor retração por secagem no concreto. Entretanto, quanto menos deformável for o agregado, maior é a reação contra a movimentação da pasta de cimento hidratada, o que ocasiona um aumento das tensões internas de tração, formando fissuras na zona de transição dos materiais. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ainda há outros fatores que influem na retração por secagem de concretos, a exemplo da composição da matriz, condições de cura e característica geométrica. Algumas medidas podem ser tomadas para reduzir tais manifestações patológicas, tais como aplicação de fibras. Visto que a formação de fissuras em matrizes cimentícias desponta por fenômenos convencionais, deve-se usufruir de recursos com fins de minimizar ou mitigar o aparecimento das aberturas. Nesse contexto, enquadram-se os reforços com o uso de microfibras, funcionando como reforços secundários, tendo mostrado uma medida cabível para as reais ocasiões, englobando fatores de desempenho e econômicos.

2.3 Concreto reforçado com fibras (CRF)

Diante das baixas resistência à tração e a ruptura frágil apresentadas pelos concretos é inevitável a aplicação de reforços. Segundo Figueiredo (2011), a fragilidade do concreto pode ser corrigida via o incremento de reforços alternativos, como é o caso das fibras. A partir da inserção desses materiais, cria-se uma nova categoria de compósitos com desempenho superior ao da matriz original, denominados como concreto reforçado com fibras (CRF). Para ACI 544.1R (2009), a caracterização de um concreto reforçado com fibras é a combinação de um aglomerante hidráulico associado com agregados miúdos e graúdos, além de fibras descontínuas dispersas aleatoriamente na mistura.

Além de Bentur e Mindess (2007), Quinino (2015) reforça a vantagem da aplicação de fibras em matrizes frágeis, a fim de proporcionar ao material maior tenacidade à fratura frágil e ductibilidade. Os compósitos com fibras possuem capacidade portante mais elevada,

deformação antes da ruptura do elemento e diminuição do número de nucleação de fissuras, quando comparados às matrizes convencionais. Diante disso, elementos com esse tipo de material apresentam maior durabilidade e, por sua vez, o prolongamento da vida útil do sistema. Ostertag e Blunt (2010) comprovaram a superioridade de um compósito com fibras em relação à formação de fissuras e durabilidade, quando comparado ao concreto convencional.

Aliado ao reforço de matrizes à base de cimento, Naaman (2008) verificou os ganhos nas propriedades do concreto quando são adicionadas fibras de aço. O autor identificou o aumento da resistência à tração do compósito, módulo de elasticidade e, consequentemente, seu potencial de deformação devido à ductibilidade obtida com o incremento do reforço. Além dos materiais metálicos, de acordo com Breña e McGuirk (2013), as fibras constituídas por polímeros também influenciaram positivamente nas propriedades mecânicas das matrizes, embora os valores fossem menos representativos.

Para Tanesi e Figueiredo (1999), a inserção de fibras nem sempre está correlacionada com o ganho de resistência à tração ou tenacidade. Pesquisas desenvolvidas por Passuello et al. (2009) e Mazzoli et al. (2015) mostram a eficiência desses materiais na contenção de fissuras originadas pela retração dos concretos, mesmo que não representem valores consideráveis nos parâmetros mecânicos.

Chodounsky e Viecili (2007) apontam diversos exemplos aplicados ao CRF, sendo um deles em pisos industriais. Segundo os pesquisadores, devido à elevada relação entre área superficial/espessura destes elementos, os índices de fissuração via retração são maximizados. Caso não sejam previstos reforços secundários, o potencial de nucleação de fissuras em uma matriz convencional eleva-se. Complementando, Hsie, Tu e Song (2008) explicam o aparecimento de tais manifestações patológicas ao proporcionamento indevido de materiais constituintes do compósito.

Chodounsky e Viecili (2007) afirmam que, mesmo um sistema de piso possuindo telas metálicas para combater o aparecimento de fissuras, as mesmas não conseguem atuar pontualmente sobre tais manifestações. Esses elementos de reforço, muitas vezes, mostram-se ineficientes, já que sua área de influência é muito pequena, quando comparadas a um compósito do tipo reforçado com fibras. Ainda, Quinino (2015) enfatiza a eficiência das fibras devido a sua área de cobertura, sendo distribuídas por toda matriz, desde que o processo de dosagem e mistura seja feito corretamente. Aspectos como a compatibilidade entre fibra e matriz também refletem no comportamento do sistema. (NEVILLE, 1997; NUNES; AGOPYAN, 1998; LEE et al., 2009; QUININO, 2015).

Tomando como referência Zollo (1997), pode-se verificar em concretos reforçados com fibras a importância das propriedades do material de reforço. Características oriundas da composição química, morfologia e procedimento de execução são fatores que geram diferentes ações dos reforços no compósito. De acordo com as constatações obtidas por Figueiredo (2000) e Bernardi (2003), o efeito da inserção de fibras no concreto, além de conter a propagação de fissuras, altera as condições de consistência e mobilidade da mistura, ou seja, provoca a perda de trabalhabilidade. Tal condição pode ser crucial em concretagens, favorecendo a má distribuição das fibras pela matriz e, como resultado, gera-se uma mistura com problemas, conforme se observa na Figura 8. (SORENSEN et al., 2014).

Figura 8 – Formação de grumos de fibras de aço devido a mistura incorreta do compósito



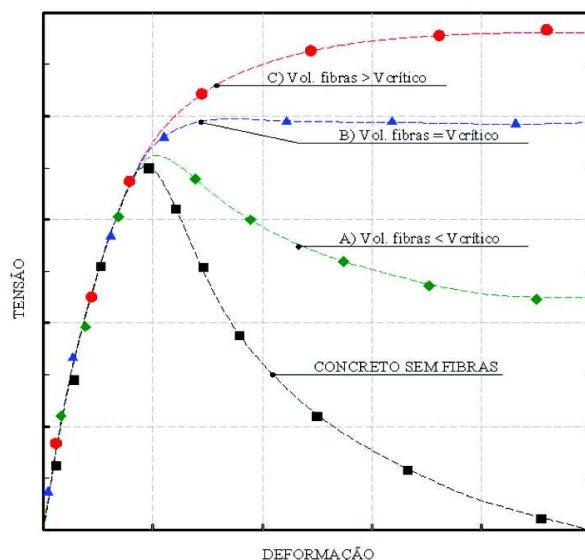
Fonte: Figueiredo (2000, p. 44).

Assim como Bentur e Mindess (2007), Figueiredo (2011) relaciona os dois fatores mais relevantes quanto a perda de trabalhabilidade da mistura. À medida em que se adicionam as fibras, dificulta-se a fluidez da pasta, ocorrendo o intertravamento das partículas do concreto, em especial, as de maiores dimensões. O segundo fator provém do aumento da área superficial total das partículas constituintes na mistura. Adicionando esses materiais, aumenta-se a área superficial de molhagem e, por sua vez, aumenta-se a quantidade de água necessária para fornecer maior coesão entre as partículas.

Sobre as frações de adições das fibras, tanto Tanesi e Figueiredo (1999) quanto Félix (2002) afirmam que existe teores ideais de adição para cada mistura. Tais valores volumétricos dependem das propriedades mecânicas e reológicas almejadas ao concreto com fibras. Segundo Bentur e Mindess (2007), no CRF, o volume de fibras para o controle de fissuras deve ser menor que 2% em função do volume de materiais secos, fazendo com que o reforço atue no combate aos esforços secundários.

Para Callister Jr. e Rethwisch (2012), devem ser determinados os volumes críticos de adição dos reforços, a fim de proporcionar melhoramentos à mistura, conforme ilustra a Figura 9, sem que haja problemas de dosagem e redução abrupta na trabalhabilidade do compósito. Todavia, a adoção de teores acima do volume crítico de fibras fornece um aumento considerável na tenacidade e resistência mecânica do material, porém há impactos negativos na consistência da mistura. Por outro lado, volumes abaixo do crítico não impactam tão severamente na trabalhabilidade do compósito e garantem ganho na tenacidade, quando comparados aos concretos sem reforço.

Figura 9 – Diagrama tensão vs deformação de concretos com variação de teores de fibras



Fonte: Figueiredo (2000, p. 14); adaptado por Quinino (2015).

Em meio a vantagens e desvantagens, não há dúvidas de que o CRF é uma alternativa cabível para diversas situações da engenharia, todavia para cada circunstância deve ser dosado com os materiais adequados, atendendo as normas vigentes. Tal narrativa vem de encontro ao estudo feito por Bentur e Mindess (1990), o qual enalteceu o comportamento deste material há quase 30 anos.

2.3.1 Componente matricial

Preliminarmente, toda a gama de matrizes cimentícias existentes, independentemente de suas propriedades, possui potencial para ser reforçada com fibras. Embora não haja restrições sobre a inserção dessas, sabe-se que o desempenho do compósito está ligado aos princípios tecnológicos necessários. (FIGUEIREDO, 2011).

Para Bernardi (2003), o componente matricial é o meio receptor de esforços e também distribuidor das tensões, as quais são suportadas pelos reforços do sistema. Estas solicitações podem ser originadas por ações externas e internas. Ainda, Neville (2013) afirma que a equalização dos esforços também está incumbida à matriz. Para que ocorra a transferência e dispersão das tensões solicitantes, a mistura deve funcionar como artifício de ligação entre os materiais e os elementos de reforço. (CALLISTER Jr.; RETHWISCH, 2012).

Em concretos e argamassas reforçadas com fibras, o papel da matriz é fornecer eficiência na transferência das forças de cisalhamento entre as camadas de fibras, a conservação da orientação dos reforços, espaçamento entre os mesmos e a proteção contra possíveis danos superficiais. (MANO, 2000).

Possuindo propriedades suficientes para proteger mecanicamente os reforços, o componente matricial também exerce a função de protegê-los quimicamente. Beber (2003) assegura que o potencial de isolamento desses componentes evita a incidência da umidade excessiva e entrada de agentes agressivos no sistema, os quais podem ocasionar a deterioração dos elementos de reforço. Em determinados casos, a ação da matriz é incisiva, possibilitando aumentar área de influência e ganhos comportamentais com o uso da fibra. (NOUSHINI et al., 2013).

De acordo com Neville (2013), as propriedades dos materiais constituintes de uma matriz podem ser determinantes nas ações provocadas pelos reforços. Matrizes do tipo orgânica, em sua maioria, apresentam-se dúcteis, ao contrário de compostos formados por misturas inorgânicas, como é o caso de concretos e argamassas, que possuem comportamento frágil. (BERNARDI, 2003).

Visando alterar o comportamento das matrizes à base de cimento, Hannant (1978) afirma que a incrementação das fibras é uma alternativa aceitável de modo a melhorar sua resistência à tração na flexão, resistência ao impacto, tenacidade, controlar com maior eficiência a nucleação de fissuras e modificar a reologia dessas misturas, impactando nas características de fluxo do material no estado fresco.

2.3.2 Elemento de reforço

Os reforços atuam como opções para melhorar as propriedades frágeis das matrizes cimentícias. Quinino (2015) destaca a possibilidade de aplicar diferentes tipos de reforços em uma matriz. Uma dessas alternativas constitui-se em reforços estruturais, no qual se enquadram os elementos confeccionados em concreto armado. Além desses, existe a possibilidade de

adotar elementos particulados, com o intuito de reforçar a matriz. (CALLISTER Jr., 2002). Tais partículas possuem morfologias distintas, passando por lâminas, flocos, tecidos e fillers, entretanto não apresentam maior capacidade de carga e rigidez, quando comparadas aos reforços em fibras. Por fim, Quinino (2015) destaca as fibras como bons elementos de reforço, as quais podem proporcionar ganhos estruturais à matriz e também fornecer propriedades que aumentem a durabilidade do compósito.

Figueiredo (2011) classifica as fibras como elementos descontínuos, cujo comprimento corresponde a maior dimensão geométrica, a qual é infinitamente superior à sua seção transversal. Nesse contexto, há diferentes categorias entre as fibras, sendo as micro e macro. Com isso, podem ser confeccionadas a partir de diversos tipos de materiais, conforme apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização mecânica e física de fibras compostas por diferentes materiais

Fibra	Massa Específica (g/cm³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento máximo (%)
Aço	7,84	200	500 – 2000	0,5 – 3,5
Acrílico	1,18	14 – 19,5	400 – 1000	3
Aramida (kevlar)	1,44	63 – 120	2300 – 3500	2 – 4,5
Carbono (alta resistência)	1,6 - 1,7	230 – 380	2500 - 4000	0,5 – 1,5
Celulose	1,2	10	300 – 500	-
Madeira	1,5	71	900	-
Nylon	1,14	4,1 – 5,2	750 – 1000	16 – 20
Poliéster	1,4	8	700 – 870	11 – 13
PVA	1,3	39	1600	-
Polietileno	0,92 – 0,96	5	80 – 600	3 – 100
Polipropileno	0,90 – 0,95	3,5 – 10	450 – 760	15 – 25
Sisal	1,5	-	800	3
Vidro	2,6	70 – 80	2000 – 4000	2 – 3,5
Matriz cimentícia (comparação)	1,5 – 2,5	10 - 45	3 - 7	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (2007, p. 2); adaptado pelo autor.

Para Bentur e Mindess (2007), a orientação dessas fibras pode ser unidirecional, bidirecional, com o uso de mantas têxteis, e tridirecional. Todas as alternativas são aplicadas na construção civil, entretanto, para a inserção em concretos, empregam-se, em maior volume, as fibras na forma de fios descontínuos unidirecionais. Vasconcelos (1994) contempla a eficiência dos fios extremamente finos, os quais possuem grandes resistências e com isso seu comportamento passa a ser inversamente proporcional a área da sua seção transversal. No momento em que se reduz o tamanho do material ocorre a diminuição da quantidade de defeitos,

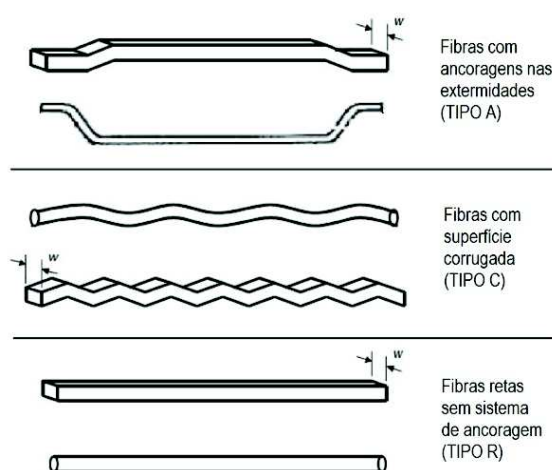
e, por sua vez, extinção das imperfeições que afetam a resistência do material. (BERNARDI, 2003).

Contextualizando tais elementos, destaca-se a diferença entre micro e macrofibras, as quais atuam em diferentes funções. A classificação das macrofibras volta-se ao desempenho do reforço após a macrofissuração da matriz. Já as microfibras agem nas idades iniciais da mistura, retardando a propagação das microfissuras. (SENISSE, 2010; FIGUEIREDO, 2011; SILVA, 2011; RAMLI; DAWOOD, 2011; QUININO, 2015).

Além dos atributos geométricos das fibras, sua composição química também deve ser atentada. Existem muitas opções de reforços com potencial de incorporação em concretos, podendo ser originados por componentes metálicos, sintéticos e naturais. (SANTIAGO, 2002). Pesquisas evidenciam a afirmação, ilustrando resultados satisfatórios com fibras de aço e PVA, como mostram Ostertag e Blunt (2010); fibras de polipropileno, segundo Tanesi e Figueiredo (1999) e Barghigiani (2013); e compósitos reforçados com fibras naturais, vistos por Savastano (2000) e Lertwattanakuruk e Suntijitto (2015).

As fibras metálicas, segundo Figueiredo (2011) e Quinino (2015), são muito aplicadas na construção civil, tendo mercado consolidado devido às suas características mecânicas e sua morfologia, conforme ilustra a Figura 10. Em detrimento das boas propriedades mecânicas, as fibras de aço são ótimas opções para fins estruturais, reforçando concretos de maneira a proporcionarem ganhos mecânicos à mistura.

Figura 10 – Classificação geométrica das fibras de aço



Fonte: Figueiredo et al (2008, p. 11); adaptado pelo autor.

Legenda: (w) largura da seção.

Produzidas através da trefilação a frio de arames de aço, formando multifilamentos, as fibras de aço possuem comprimentos e diâmetros variados. (BERNARDI, 2003). Devido seu processo de produção, esses elementos podem ser confeccionados com diversos formatos. Para a ABNT NBR 15530:2007, as fibras metálicas inseridas em concretos devem atender a classificações preescritas, quanto ao seu processo de fabricação, e as conformações geométricas, sendo corrugadas, com ancoragem nas extremidades ou retas.

Fibras com ancoragens e texturas superficiais possibilitam melhor interação com a matriz cimentícia, sendo mais eficiente quando comparados aos reforços lisos e sem ganchos. Em concretos, atuam como uma armadura multidirecional, possibilitando ao compósito um aumento de resistência de pós-fissuração e a diminuição na propagação de fissuras.

As fibras naturais, segundo Grison e Hoinack (1985), Savastano (2000) e Bernardi (2003), podem ser disseminadas em diferentes classes, dentre elas a classe vegetal, animal ou mineral. Sua aplicabilidade na construção civil já é feita há milênios, mostrando ser uma alternativa convincente. Com o desenvolvimento da indústria química e metalúrgica, seu papel na engenharia foi trocado por outros materiais mais atrativos, que possuem propriedades melhoradas. (ONUAGULUCHI; BANTHIA, 2016). Todavia, a constante busca por novos recursos para reforços de matrizes cimentícias vem aflorando diversas tendências, entre elas encontram-se os materiais naturais. (BECKER et al., 2014).

Provenientes de fontes naturais, as fibras vegetais ganham força no mercado da construção civil por ter um baixo custo, baixa massa específica e não serem abrasivas, o que é desejável do ponto de vista prático, evitando maiores desgastes nos equipamentos de mistura e lançamento. (LI et al., 2007). Segundo Pothan e Thomas (2003), em alguns casos, as fibras vegetais podem substituir as fibras sintéticas em compósitos.

Hoje, as fibras vegetais vêm mostrando avanços em pesquisas, tendo como matéria prima as de sisal, bambu, bananeira, juta, coco e linho. (BOGHOSSIAN; WEGNER, 2008; YANG et al., 2015; LERTWATTANARUK; SUNTIJITTO, 2015). Um dos grandes motivos que alimenta as pesquisas sobre concretos com fibras vegetais volta-se a capacidade mecânica desses reforços. (BENTUR; MINDESS, 2007). Segundo Savastano Jr e Agopyan (1999), mesmo mostrando baixo módulo de elasticidade, as fibras vegetais possuem, normalmente, elevada resistência à tração e capacidade de absorção de energia.

A durabilidade desse material em matrizes cimentícias é questionável. O hidróxido de cálcio disperso na matriz influi na integridade da lignina e da hemicelulose, as quais estão presentes na lamela central das fibras, desestabilizando a microestrutura do material. (TOLEDO

FILHO et al., 2000). Gram (1988) reforça que a separação e degradação das moléculas de celulose acontece através da hidrólise alcalina, cuja qual reduz a resistência à tração da fibra.

Abordando os parâmetros de durabilidade das fibras em meio alcalino, destacam-se os materiais sintéticos. De modo geral, essas fibras foram desenvolvidas com o intuito de atender as necessidades impostas pela indústria. Sua produção é feita através de processos com alto padrão de controle, objetivando melhorar e ampliar as opções de mercado. Conforme Quinino (2015), a confecção desses materiais sintéticos direciona o aperfeiçoamento e cópia das fibras naturais. Para Bernardi (2003) e Senisse (2010), o grupo mais interessante das fibras sintéticas é o das fibras poliméricas, sendo classificadas como artificiais.

A inserção de fibras poliméricas na construção civil é concebida há muito tempo e feita de diversas maneiras. Sua inclusão pode ser realizada em inúmeras matrizes, a fim de complementar as propriedades do compósito. Segundo Mazzoli et al. (2015), as fibras sintéticas mais utilizadas na construção civil são as de polipropileno e nylon, embora alguns autores destaquem trabalhos voltados ao estudo de reforços em poliéster, polietileno e PVA.

Mostrando ser um material atrativo, as fibras poliméricas tornaram-se boas opções para complementar os concretos convencionais. De acordo com Santos (2002), as fibras poliméricas são materiais com ótimo comportamento mecânico, onde suas propriedades, muitas vezes, superam as do aço. Todavia, Tanesi e Figueiredo (1999) destacam seu baixo módulo de elasticidade, proporcionando ao material uma grande capacidade de deformação. Para fins estruturais, as fibras sintéticas não possuem características muito atrativas, tendo como principal intuito de adição à extinção de fissuras por retração plástica e por secagem dos compósitos. (QUININO, 2015; SENISSE, 2010; TANESI; FIGUEIREDO, 1999).

2.3.3 Interação fibra-matriz

Bernardi (2003) afirma que compósitos são materiais multifásicos, sendo a sinergia entre o refoço e a matriz um parâmetro crucial para garantir o desempenho mecânico da mistura. A interface entre os elementos que compõem o concreto com fibras apresenta controle sobre as características do conjunto, passando a ser avaliado o comportamento integrado de todos os materiais do sistema e não de forma isolada. (MANO, 2000). Bentur e Mindess (2007) enfatizam a grande importância da interrelação entre o material de reforço, a fibra e o componente matricial, o concreto. As propriedades do concreto reforçado com fibras dependem da sua composição, a fim de adquirir um desempenho satisfatório em diferentes situações de carregamento.

Assim como os agregados e a pasta cimentícia, a inserção de fibras promove a criação natural de uma zona de transição entre o reforço e a matriz, a qual depende das características da própria fibra, de acordo com Figura 11. As propriedades dessa interface refletem na eficiência entre a fibra e a matriz. (PIASTA; SIKORA, 2015). A composição da matriz cimentícia, a geometria das fibras, o formato físico do reforço e as propriedades químicas do mesmo são envolvidas nos aspectos de interface desses materiais. (MINDESS, 1995)

Figura 11 – Interface entre fibras de aço e matrizes cimentícias



Fonte: Bentur e Mindess (2007, p.22); adaptado pelo autor.

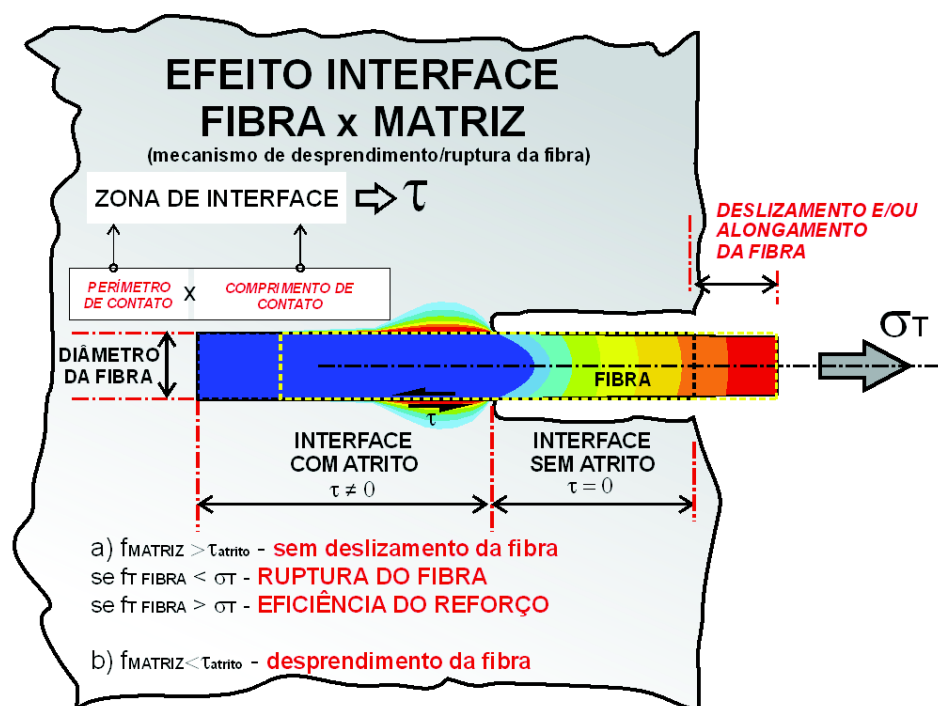
Soltani et al. (2013) afirmam que a aplicação e magnitude das tensões de aderência entre os vínculos determina a distribuição dos esforços da matriz para a fibra. Problemas na zona de interface tendem a diminuir o potencial de transferência de tensões do concreto para o reforço e, assim, as tensões permanecem na própria matriz que é fragilizada.

A adição de fibras em matrizes cimentícias parte do propósito de melhorar as propriedades da mistura. Para que isso aconteça, a interação entre os materiais deve acontecer de forma eficaz. (FIGUEIREDO, 2011; OSTERTAG; BLUNT, 2010; JUAREZ et al., 2015). Com isso, a principal função da interface é permitir e garantir que a transferência dos esforços da matriz seja feita de maneira adequada para o reforço. (BERNARDI, 2003; BENTUR; MINDESS, 2007). Caso não haja um controle eficiente na escolha dos materiais, na dosagem da mistura ou execução, a interface pode ser comprometida, tornando o compósito ineficiente. (NAAMAN, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Fibras com melhor desempenho tendem a fornecer à matriz melhores propriedades. Todavia, existem fatores que fazem com que isso não ocorra de forma constante. Hannant (1978) destaca que a maioria das fibras utilizadas como reforço em concretos, quando submetidas aos esforços, são, literalmente, arrancadas da matriz, sem afetar suas características

morfológicas e mecânicas, conforme apresenta da Figura 12. Com isso, nota-se que os problemas não estão vinculados apenas à resistência da matriz ou do reforço, mas sim na interação fibra-matriz.

Figura 12 – Distribuição de tensões na zona de interface entre a fibra e a matriz cimentícia

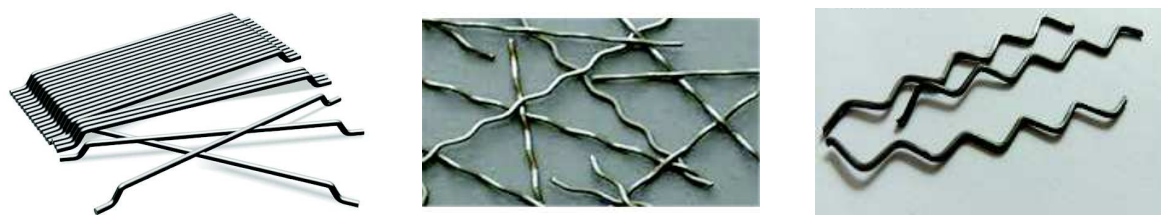


Fonte: Bentur e Mindess (2007); adaptador por Quinino (2017).

O atrito entre o reforço e a matriz cimentícia é relativamente fraco, e sabe-se que há uma contribuição significativa nos resultados mecânicos do compósito. A fim de melhorar a eficiência dessa interação física, Bentur e Mindess (2007) comentam que é necessário avançar sobre as características da matriz, refinando-a e baixando sua porosidade. Caso não seja possível alterar as propriedades da mistura, recomenda-se interferir no reforço. (MAZZOTTI et al., 2009).

Figueiredo (2011) demonstrou algumas alternativas para melhorar as propriedades de ligação entre o elemento de reforço e a matriz cimentícia. Pode-se imprimir às fibras formatos que auxiliem e aumentem a área superficial de engastamento com a pasta de cimento. Hoje, no mercado, existem fibras de diferentes materiais com superfície corrugada, diminuindo o efeito de arrancamento. Além dessa alternativa, podem ser criados ganchos nas extremidades das fibras, a fim de melhorar o engastamento entre os materiais e formar um conjunto compacto, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 13 – Fibras de aço com diferentes conformações superficiais

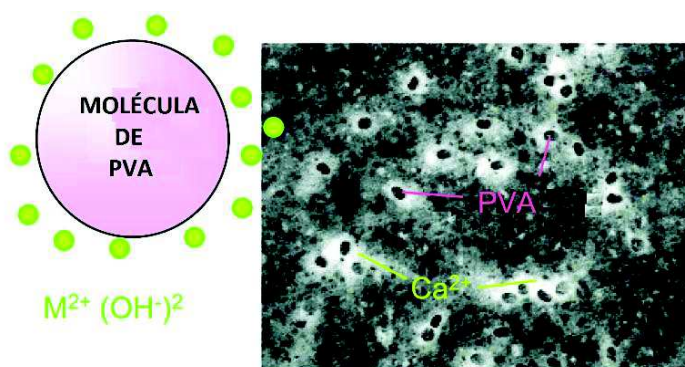


Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora as alternativas de melhoramento na zona de interface entre materiais sejam físicas, pesquisas são desenvolvidas para garantir melhor eficiência via reações químicas entre o reforço e a matriz. (SCHWARTZENTRUBER et al., 2004; LEE et al., 2009; HAMOUSH et al., 2010; JUAREZ et al., 2015). As ligações químicas entre o reforço e a pasta de cimento tornam-se dependentes dos tipos de materiais empregados. Segundo Noushini et al. (2013), as fibras compostas por PVA são ótimos exemplos para ilustrar a eficiência mecânica da zona de interface entre o reforço e a matriz à base de cimento, por meio de reações químicas. Esse tipo de material é composto por álcool polivinílico, o qual é facilmente hidrolisado em soluções alcalinas. (FELDMAN, 1989; LI et al, 2002).

Conforme Xu et al. (2010), o PVA contém grupos de hidroxilas (OH), possuindo grande potencial de formar ligações entre moléculas apartir do hidrogênio encontrado nos hidróxidos do concreto, conforme Figura 14. Dessa maneira, é notável a mudança de resistência na união entre a fibra e a matriz.

Figura 14 – Interação química entre fibras de PVA e matrizes cimentícias



Fonte: Kuraray (2015).

Devido à ligação química entre os componentes do conjunto, eliminam-se as chances de ocorrer o fenômeno de arrancamento do reforço, pois a interação mostra-se tão resistente, que, em alguns casos, supera as propriedades da própria fibra. (LI et al., 2004;

NOUSHINI et al., 2013). Com isso, o ponto frágil passa a ser as propriedades mecânicas da fibra e não mais a zona de interface. (TOUTANJI et al., 2010).

2.4 Particularidades de materiais compósitos cimentícios reforçados com fibras sintéticas

O desempenho das matrizes à base de cimento reforçadas com fibras está ligado às características do reforço. Tais elementos podem ser seccionados em dois grupos, as microfibras e as macrofibras, conforme Figura 15. Ambas possuem funções e parâmetros geométricos diferenciados.

Figura 15 – Fibras poliméricas de diferentes tipos



(a)

(b)

Fonte: Figueiredo (2011, p. 14)

Legenda: (a) macrofibras poliméricas; (b) microfibras de polipropileno.

Segundo Bentur e Mindess (1990), as macrofibras são reforços que atuam estruturalmente nos compósitos, pelo fato de serem exigidas apenas após a fissuração da matriz. As propriedades mecânicas das matrizes são mais impactadas quando se aplicam macrofibras, desde que o material constituinte proporcione essas características. A presença de macrofibras afeta o modo de ruptura da matriz, a qual passa a ser suavizada pela presença do reforço.

Já as microfibras são conhecidas por possuírem diâmetros inferiores a 50 μm e pequenos comprimentos. Esses elementos não atuam com função estrutural, embora possam fornecer ao material algumas leves alterações no comportamento mecânico. (BARGHIGIANI, 2013). A falta de eficiência nos comportamentos mecânicos das matrizes com microfibras vincula-se, principalmente, pela falta de compatibilidade dimensional entre o reforço e os agregados graúdos. (FIGUEIREDO, 2011).

Tanesi e Figueiredo (1999) afirmam que o emprego de microfibras em matrizes cimentícias visa conter a formação e o desenvolvimento das fissuras nas primeiras idades do concreto. Retardando o processo de propagação das microfissuras com o uso de microfibras, pode-se aumentar a durabilidade do material, evitando a entrada de agentes agressivos.

Em alguns casos, não há interrupção na propagação das fissuras microscópicas, mesmo com a presença de microfibras. (QUININO, 2015). Por sua vez, a inserção desses reforços faz-se necessária devido à nucleação de fissuras nas primeiras idades da matriz, ou seja, quando sua influência é muito mais significativa.

O concreto, após o seu lançamento, sofre ações por meio da perda de água para o ambiente e para as reações de hidratação do cimento, propiciando a retração da pasta e, conseqüentemente, o aparecimento de microfissuras. (NEVILLE, 2013). Visto que nessa etapa as propriedades mecânicas da matriz ainda não se encontram bem desenvolvidas, reforços com capacidade de deformação e absorção de tensões tornam-se boas alternativas, caso das microfibras sintéticas. (TANESI; FIGUEIREDO, 1999; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esses reforços poliméricos possuem a capacidade de retardar o aparecimento da primeira fissura na matriz de maneira enérgica, uma vez que o seu módulo de elasticidade, por mais que seja baixo, ainda é superior ao da mistura nas primeiras idades. (BOGHOSSIAN; WEGNER, 2008).

A eficiência desses reforços em uma matriz cimentícia é dependente do teor de adição utilizado, módulo de elasticidade do material, composição geométrica e a sinergia entre os elementos. No que diz respeito às fibras sintéticas, mais precisamente as poliméricas, deve-se destacar a sua área superficial específica, a qual pode aumentar consideravelmente a área superficial de materiais em uma matriz cimentícia e, conseqüentemente, demandar um consumo maior de água. (TANESI; FIGUEIREDO, 1999). Algumas limitações são impostas naturalmente a essas fibras, pois apresentam baixo módulo de elasticidade e, sendo assim, não influem radicalmente nos comportamentos mecânicos dos compósitos. (SENISSE, 2010; YIN et al., 2015).

2.5 Hibridização de fibras em matrizes cimentícias

Sabe-se que a inclusão de reforços descontínuos e distribuídos de maneira uniforme tende a garantir, ao material, capacidade de suportar a ação de esforços, evitando a propagação de fissuras e trincas. A medição do desempenho dessas misturas passa pela variabilidade dimensional e do material constituída da própria fibra. Corroborando com as informações, Quinino (2015) afirma que a aplicação de fibras distintas em concretos é feita para diferentes

fins. Existem fibras que combatem os esforços de primeira ordem (primários), ou seja, possuem função estrutural, e fibras que atuam na contenção de esforços de segunda ordem (secundários), como a fissuração por retração. (BENTUR; MINDESS, 2007; TANESI; FIGUEIREDO, 1999)

Em sua maioria, os estudos voltados à confecção de compósitos cimentícios são feitos de maneira convencional, testando unicamente um tipo de reforço fibroso. Pesquisas relatam a eficiência de compósitos formados a partir de apenas um tipo de reforço para uma determinada situação. (ALTUN et al. 2013). Tais materiais têm vantagens e desvantagens sobre os compósitos. Porém, o cenário científico está sendo modificado há algumas décadas, através de pesquisas (CHRIST, 2014; MARTINELLI et al., 2015; OSTERTAG; BLUNT, 2010; PASSUELLO et al., 2009; QUININO, 2015; YU et al., 2016; SUN et al., 2001), que atestam a eficiência do conjunto quando se mesclam diferentes tipos de fibras.

2.5.1 Comportamento dos compósitos híbridos

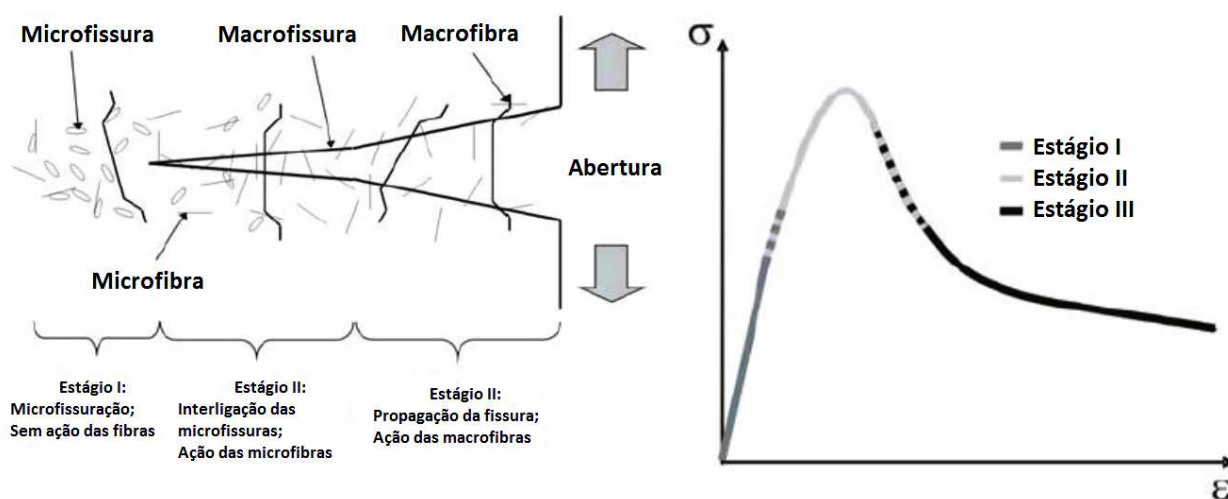
Segundo Quinino (2015), o uso de um ou mais tipos de fibra, quando seguem parâmetros adequados de dosagem e combinação, pode resultar na otimização do desempenho dos compósitos e proporcionar bom comportamento em diferentes situações. Em concretos, essa alternativa possibilita sanar diferentes tipos de solicitações, tornando o material mais íntegro, durável e estabilizado. (XU et al., 1998).

Materiais compósitos hibridizados são constituídos por meio da combinação de diferentes tipos de fibras, as primárias e secundárias. Objetivando aumentar a capacidade portante e ductibilidade do material, adicionam-se fibras primárias. Por outro lado, utilizam-se as fibras secundárias a fim de controlar a nucleação de fissuras. (QUININO, 2015). Desse modo, Banthia e Gupta (2004) ressaltam que, para chegar a uma combinação eficiente de reforços primários e secundários, as características de cada fibra devem ser conhecidas. Os autores enumeram alguns parâmetros para avaliação do desempenho esperado aos compósitos hibridizados, exemplo das propriedades mecânicas de cada fibra, como resistência à tração, ductibilidade e flexibilidade. Tratada como segunda observação, as dimensões das fibras tendem a impactar fortemente nos resultados, onde a combinação entre micro e macrofibras torna-se uma ótima alternativa de mistura. Definir previamente a função de cada fibra no compósito também traz eficiência ao material, caso seja feita corretamente. Com isso, deve haver uma distribuição de reforços para atuarem, prioritariamente, nas idades iniciais da mistura e elementos que beneficiem as propriedades mecânicas.

Mehta e Monteiro (2014) afirmam que uma das alternativas para evitar e controlar as microfissuras está interligada com a adição de reforços alongados e de pequenos diâmetros. Quinino (2015) aponta que um dos fatores predominantes nos resultados das matrizes cimentícias está relacionado com o espaçamento entre as microfibras. Segundo o autor, as fibras menores e mais finas favorecem a distribuição na mistura, ampliando a área de atuação e diminuindo os espaçamentos entre os reforços. Segundo Vairagade e Kene (2012), a performance desses pequenos reforços é determinante para as etapas procedentes, as quais se voltam ao comportamento mecânico do compósito. Todavia, a trabalhabilidade de matrizes com a inserção de microfibras é mais afetada quando comparada ao mesmo volume de macrofibras. (ACI 544.1R, 2009).

Em meio à propagação das microfissuras, as fibras de maiores dimensões são acionadas. Devido suas características mecânicas e geométricas, as macrofibras atuam após o exercício das microfibras em diferentes estágios, conforme Figura 16. Havendo a propagação da fissura, as microfibras perdem seu potencial de contenção e, nesse caso, sua funcionalidade. O desempenho pós-fissuração fica ao encargo das macrofibras, as quais estabilizam estruturalmente o elemento, aumentando a resistência do material, ductibilidade e tenacidade. (BENTUR; MINDESS, 1990).

Figura 16 – Efeito da hibridização de fibras em matrizes cimentícias



Fonte: Lawler et al. (2003, p. 203); adaptado pelo autor.

Conforme verifica-se na Figura 16, o comportamento mecânico de um compósito com hibridização de fibras pode ser dividido em três estágios, segundo Lawler et al. (2003). O estágio I é referente ao comportamento normal da matriz cimentícia, quando submetida aos carregamentos, aumentando as tensões internas e criando as microfissuras. Com o aumento das

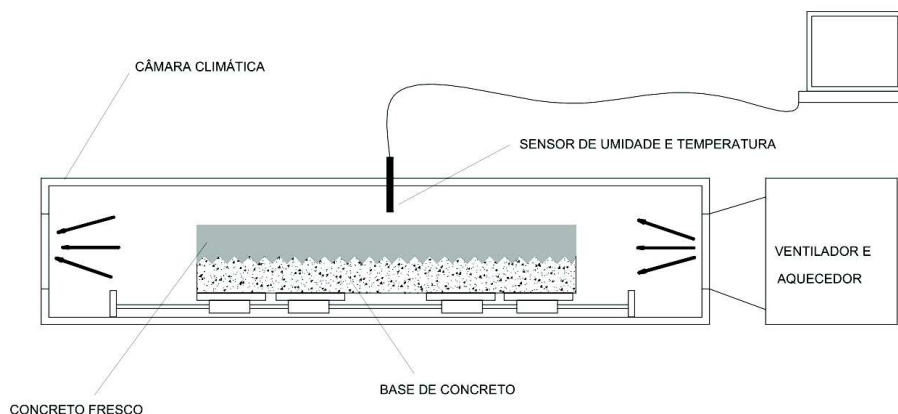
tensões internas, ocorre a interligação das microfissuras e, assim, o acionamento das microfibras para conter a propagação dessas pequenas aberturas, caracterizando o estágio II. Ainda havendo a propagação de fissura, devido a compatibilidade dimensional, as microfibras perdem a funcionalidade e, com isso, são acionadas as macrofibras. A ativação das macrofibras corresponde ao estágio III dos compósitos com hibridização geométrica, sendo muito importantes no desempenho pós-fissuração da matriz cimentícia.

2.6 Determinação experimental da retração por secagem restringida

Em função dos diversos fatores que influem na retração por secagem restringida de uma matriz cimentícia, a instrumentação experimental pode conduzir a valores dispersos, inviabilizando correlações entre diferentes misturas. (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Os procedimentos de ensaio para determinação da retração por secagem podem ser eficientes apenas para algumas condições ambientais e medidas de dosagem dos materiais. (TANESI; FIGUEIREDO, 1999). No caso da variabilidade dos métodos de avaliação, a fim de projetar programas mais próximos das condições encontradas *in loco*, os ensaios de retração restringida podem ser divididos em dois tipos: ensaio de anel e ensaio de placas.

O ensaio de placas é realizado a fim de determinar as consequências da retração em elementos com grandes áreas superficiais e baixas alturas, como por exemplo, pisos ou lajes. Nesse ensaio a amostra exposta à retração por secagem é maior em relação a do método de anel e tem formato de uma placa. Dentre os ensaios de placas, destaca-se o experimento desenvolvido por Kraai (1985), o qual avaliou a formação de fissuras na placa à medida em que ocorre a restrição na movimentação por retração da matriz. A secagem é feita através de ventiladores, os quais simulam a incidência de ventos sobre a superfície exposta do elemento, com temperatura e umidade controladas. A Figura 17 ilustra a instrumentação do ensaio de retração restringida em placas.

Figura 17 – Instrumentação de retração restringida pelo método de placas



Fonte: Banthia et al. (1996); adaptado por Nunes e Figueiredo (2007).

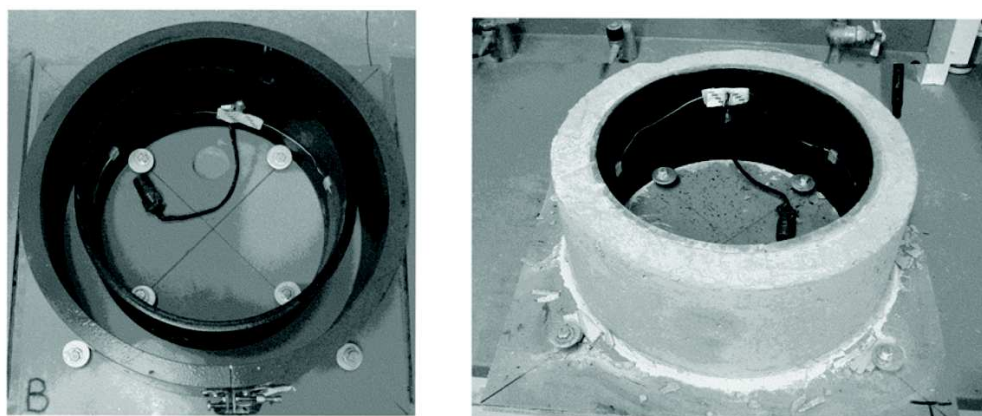
Para efeitos comparativos, no ensaio de placas algumas amostras podem ser submetidas a ação do vento e outras não, dependendo das condições em que o elemento estará submetido. (NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Para que as condições de ensaios sejam mais próximas da realidade, restringe-se a movimentação do elemento através da sua fixação com o uso de telas de arame no seu plano de movimentação ou sendo possível aplicar-se a amostra sobre uma base de concreto com superfície corrugada, conforme Figura 17. Com isso, é possível simular a presença dos ventos e sua influência na retração da matriz, assim como as consequências da variação e umidade do ambiente experimental.

Uma das vantagens desse método é a proximidade com as condições climáticas de campo em que a matriz está exposta e também assemelhar o grau de restrição de movimento do concreto. Todavia, o método mostra algumas deficiências nos processos de instrumentação, visto que não é possível determinar com precisão o comportamento físico das amostras frente a retração restringida. Devido a falta de instrumentação para identificar e quantificar as deformações do elemento, não é possível identificar a formação da fissura, com isso, perde-se a possibilidade de comparar numericamente as deformações de uma matriz para com a outra e a idade de fissuração. Além desse fator, a formação de fissura não é constatada com exatidão, sendo necessário monitorar intensamente a matriz durante todo o período de ensaio. Assim, pela falta de equipamentos de mensuração, o ensaio delimita-se apenas às análises visuais do elemento.

Ao contrário do ensaio de placas restringidas, é possível adotar métodos mais precisos para mensurar o comportamento de matrizes cimentícias frente a retração restringida. Desenvolvido por Coutinho (1954), o ensaio de anel é amplamente utilizado e presente em vários trabalhos experimentais. Atualmente, esse método é balizado pela norma ASTM

C1581:2009. Diante das limitações impostas para mensurar a intensidade de tensões provocadas pela retração, autores como Zhu et al. (2015) e Grasley e Dambrosia (2011) detectaram e avaliaram os esforços gerados na matriz pelo método do ensaio de anel. É possível identificar a magnitude da retração de argamassas e concretos. A Figura 18 apresenta a instrumentação do ensaio de anel restringido em concretos.

Figura 18 – Retração por secagem restringida em concretos pelo método de anel



Fonte: ASTM C1581/1581M (2009, p. 3)

Visto que a retração restringida eleva os esforços internos de tração e, por sua vez, sustenta a nucleação de microfissuras as quais são pouco detectáveis. Com o ensaio de anel é possível constatar o instante em que se dá o início da formação das fissuras devido ao pico de tensão identificado pelo sistema de instrumentação. Por isso, existe a possibilidade de estender tais métodos aos compósitos cimentícios reforçados com fibras, já que o desempenho desses materiais se relaciona com a sua composição, variando o tipo de reforço inserido. (DANTAS, 1987). Além desses fatores, o ensaio de retração pelo método de anel é conhecido como o mais adequado para a determinação da idade de fissuração e mensuração das deformações de uma matriz cimentícia.

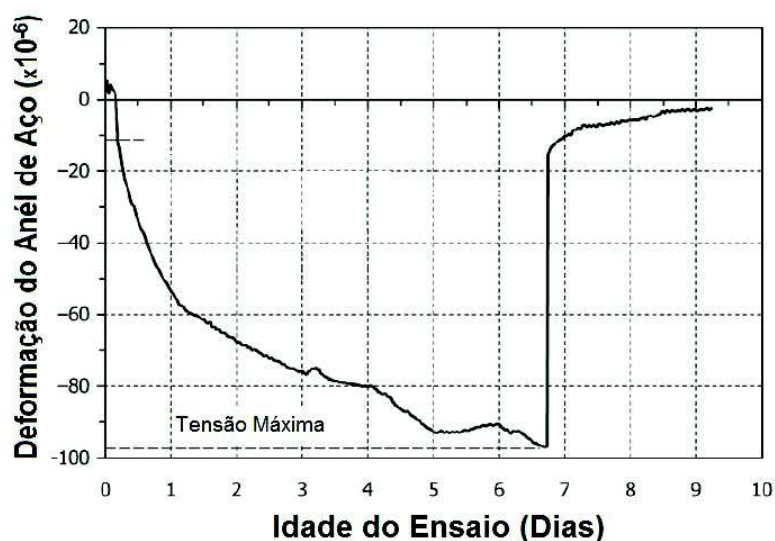
Atualmente, a norma que regulamenta os procedimentos de ensaio ao método do anel restringida é a ASTM C1581/1581M:2009. Com o ensaio de anel é possível definir as propriedades das misturas em relação ao seu potencial de fissuração, devido à retração por secagem. Também se observa as tensões geradas pela contração da mistura, as quais são exercidas sobre um anel interno de aço, conforme Figura 18. Esse método de ensaio promove a restrição da movimentação das misturas cimentícias, aproximando-se das condições reais em que os materiais são expostos. No processo de secagem do concreto criam-se tensões de compressão sobre o núcleo metálico. Essas tensões de compressão são oriundas da retração da

mistura e deformam o núcleo metálico. Tais deformações são ínfimas e imperceptíveis a olho nú. Com isso, para a aferição dessas grandezas, necessita-se adotar medidas com maior sensibilidade, no caso, extensômetros elétricos.

Ligado aos extensômetros há um equipamento de aquisição de dados, o qual emite pulsos elétricos aos extensômetros e submete a conversão de dados identificados pelos mesmos, de Volts (V) para microns ($\mu\text{m/m}$). As informações são armazenadas em tempo real pelo equipamento ligado ao PC/Notebook.

Conforme a retração do compósito cimentício ocorre, as deformações avançam. Caso ocorra o alívio dos esforços, identifica-se a nucleação da primeira fissura na mistura, conforme ilustra a Figura 19. Segundo Mokarem et al. (2005), os alívios de tensão retratam o momento em que as tensões acumuladas no compósito, em virtude da diminuição de volume e restrição de movimento imposta pelo aparato, se dispersam pela abertura formada. Após a fissuração, as tensões diminuem gradativamente.

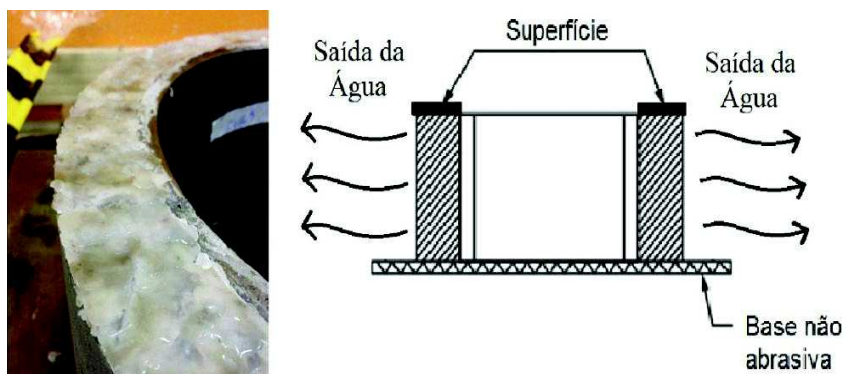
Figura 19 – Deformação perimetral do anel e criação da primeira fissura na amostra



Fonte: ASTM C1581/1581M (2009, p.4); adaptado pelo autor.

A retração da mistura nesse ensaio é unidirecional, ocorrendo contra o núcleo metálico e tendo as deformações diametralmente. De acordo com a ASTM C1581/1581M:2009, passadas 24 horas da concretagem, deve-se retirar a fôrma externa e selar a parte superior do anel concretado, forçando a saída da água contida na mistura pelas laterais da amostra. A vedação foi executada com a aplicação de parafina líquida. A Figura 20 ilustra o processo de selagem da face superior e a perda de água pelas arestas.

Figura 20 – Tratamento superficial da amostra com o uso de parafina líquida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa maneira, seguindo os procedimentos e adotando o ensaio de anel restringido é possível atingir com mais precisão as propriedades físicas de retração das matrizes cimentícias. Ilustrando ser um processo melhor instrumentado e possuindo norma internacional, torna-se subjetivo utilizar tal método para caracterização de concretos convencionas e reforçados com fibras.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o potencial de fissuração de um concreto referência sem fibras e quando reforçado de maneira isolada e híbrida com microfibras poliméricas, partindo de análises experimentais frente à retração por secagem restringida, análises microestruturais e suas propriedades mecânicas.

Dessa forma, tem-se o programa experimental descrito a seguir. No capítulo 3 foram descritos os procedimentos de instrumentação, métodos e os materiais utilizados para a elaboração da pesquisa.

3.1 Estratégia de pesquisa

A caracterização dos compósitos com microfibras isoladas e combinadas foi feita através de ensaios prescritos pelas normas nacionais e internacionais, expressas nesse capítulo. Os parâmetros de análise basearam-se em critérios relacionados aos reforços utilizados, a matriz cimentícia que será reforçada e a quantidade de adição de cada fibra. Desse modo, definiram-se como variáveis da pesquisa o tipo de microfibra a ser utilizada, sendo poliéster, polipropileno e PVA; o formato geométrico e as dimensões de cada reforço, tendo alguns mais curtos, alongados e esbeltos; e as propriedades mecânicas desses elementos, aplicando materiais com resistência à tração e módulo de elasticidade distintos, quando comparados uns aos outros.

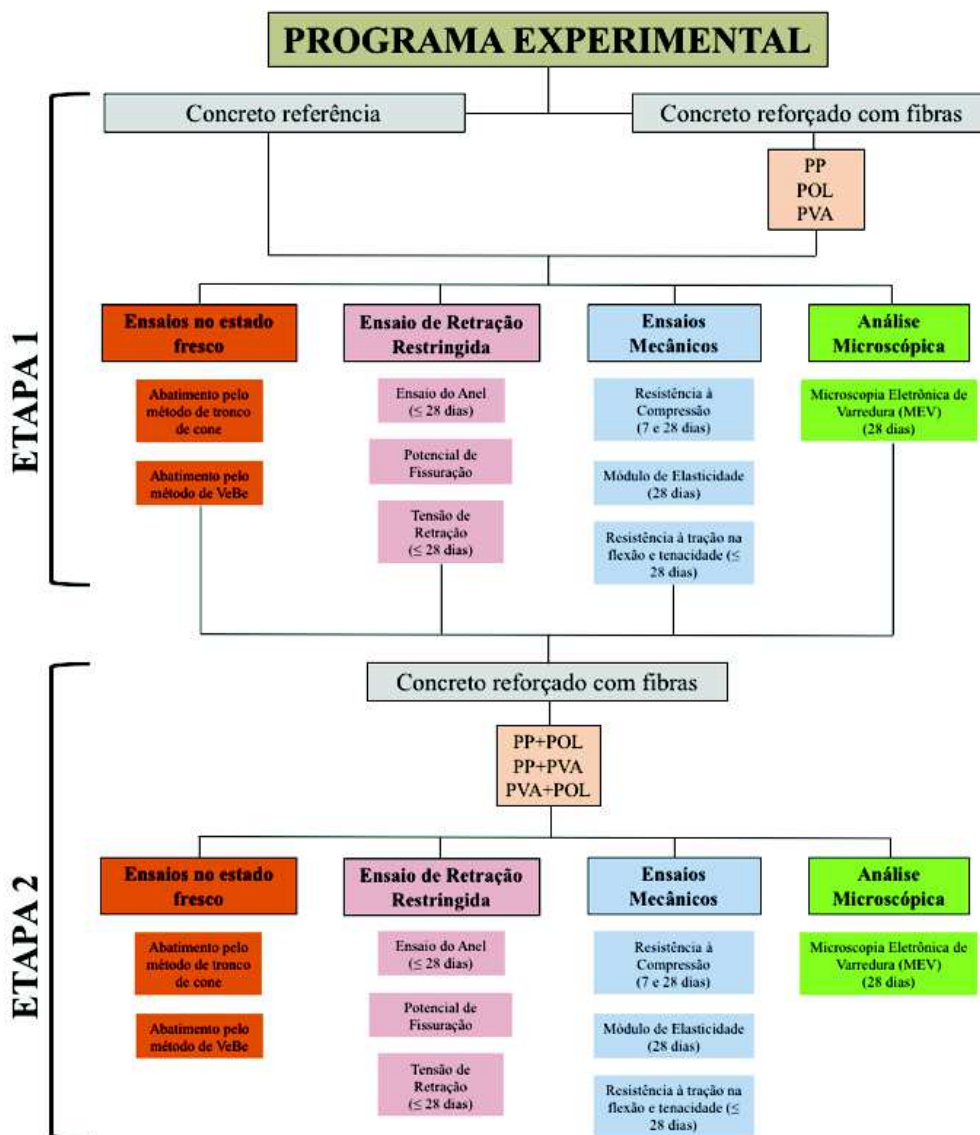
Já como critérios fixos da pesquisa estão a matriz cimentícia e o teor total de microfibras no compósito. Assim, definiu-se uma matriz referência, a qual recebeu a inserção dos diferentes tipos de microfibras estudadas na pesquisa. O teor de adição total foi fixado em 0,50% em relação ao volume de materiais secos. Com isso, fixando esses parâmetros, é possível verificar a influência dos reforços em uma matriz padrão quando reforçada com o mesmo teor de adição de fibras.

A pesquisa foi dividida em duas etapas para definições das proporções dos reforços. A primeira etapa correspondeu à caracterização do concreto referência e os compósitos com as fibras isoladas. Com base nos resultados encontrados no ensaio de anel da etapa 1, definiram-se os teores de hibridização dos reforços na matriz, reformulando os diferentes compósitos apresentados na segunda etapa.

3.2 Planejamento de ensaios

A Figura 21 ilustra o organograma da pesquisa, o qual destaca as variáveis, os materiais e os ensaios realizados.

Figura 21 – Fluxograma do programa experimental da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

A pesquisa abrangeu ensaios para determinação das propriedades mecânicas das misturas, como resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração na flexão e fator de tenacidade. Também foram realizados os ensaios de retração restringida e análises microscópicas. Na Tabela 2 são apresentadas as diretrizes utilizadas nos ensaios de retração restringida pelo método do anel.

Tabela 2 – Programa experimental para caracterização mecânica dos compósitos

Etapa	Compósito	Teor de Fibras, em volume (%)	Híbrid. (%)	Corpos de Prova			Ensaio (dias)		
				Anel	Cilind.	Prism.	7 e 28	≤ 28	28
1	Concreto Referência	0	-	3	12	4	Resistência à Compressão	Tração na flexão Fator de tenacidade Ensaio de anel	Módulo de Elast.
	C-PP	0,50	-	3	12	4			
	C-POL		-	3	12	4			
	C-PVA		-	3	12	4			
2	C-PP+POL		30 + 70	3	12	4			
	C-PP+PVA		30 + 70	3	12	4			
	C-PVA+POL		50 + 50	3	12	4			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Tomando como base a Tabela 2, o período máximo de ensaio de anel restringido é de até 28 dias, segundo a ASTM C1581/1581M:2009, pois, caso o compósito apresente fissuras antes do tempo estipulado, adota-se como idade final a data de constatação visual da primeira fissura. Os ensaios de resistência à tração e tenacidade foram realizados no mesmo período do ensaio de anel, ou seja, nos primeiros 28 dias, com o objetivo de determinar as características do compósito no momento em que ocorreu a nucleação da primeira fissura via ensaio de retração.

A análise da microestrutura dos compósitos ocorreu com a utilização de ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com propósito de constatar a integridade física dos reforços no concreto, a zona de interface, a interação fibra-matriz e identificar a distribuição dos reforços no concreto. Para cada ensaio foi extraída uma amostra dos anéis em concreto, após finalizados os ensaios de retração por secagem restringida.

3.3 Seleção de materiais

Os materiais selecionados para a pesquisa foram adquiridos na região da grande Porto Alegre, sendo produzidos e extraídos nessa localidade, com exceção das microfibras de álcool polivinílico (PVA) e polipropileno, originárias do Japão e São Paulo, respectivamente. Os itens a seguir apresentam os materiais necessários para a produção dos compósitos dosados no estudo.

3.3.1 Cimento

O cimento empregado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial resistente aos sulfatos (CP V-ARI RS), produzido pela empresa Votoran Cimentos Ltda. As características químicas desse material garantem ao compósito elevadas resistências nas idades iniciais em função da aceleração na hidratação do cimento anidro. Em razão da rápida hidratação dos grãos, o consumo de água pelas partículas torna-se mais expressivo nos primeiros dias, potencializando a retração das matrizes cimentícias. Com isso, as tensões internas geradas são intensificadas pela magnitude da retração da mistura. A determinação das propriedades químicas do cimento seguiu os critérios da ABNT NBR 11578:1991 e estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do cimento

Determinações químicas	Teor (%)
Resíduo insolúvel (RI)	11,6
Perda ao fogo (PF)	3,1
Óxido de magnésio (MgO)	6,4
Trióxido de enxofre (SO ₃)	3,3
Anidrido carbônico (CO ₂)	2,8

Fonte: Elaborado pelo autor.

A composição granulométrica do material foi obtida através do ensaio de análise de granulometria a laser disponibilizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMAT) da UNISINOS. Realizou-se o ensaio em via úmida, a fim de favorecer a dispersão dos grãos de cimento, seguindo o procedimento da ABNT NBR 16137:2016. O fluido utilizado foi álcool isopropílico. A Tabela 4 apresenta a distribuição granulométrica do cimento utilizando o D10, D50 e D90.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado

Concentração (%)	Tamanho (μm)
10	7,87
50	19,48
90	29,38

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com as informações coletadas pelo fabricante do produto, o cimento comercializado atendeu aos quesitos da ABNT NBR 5733:1991. A massa específica do material é de 3,04 g/cm³, sendo obtida através do ensaio especificado pela ABNT NBR NM 23:2000.

3.3.2 Agregado miúdo

A pesquisa contou como agregado miúdo a areia natural de rio. Foram utilizados dois tipos de areia, com a proporção de 80% de areia média e 20% de areia fina, para promover o empacotamento dos grãos. Além disso, a utilização de agregados miúdos com dimensões granulométricas reduzidas resulta na potencialização da retração por secagem dos concretos. A proporção dos agregados miúdos adotada foi baseada em pesquisas, as quais sustentam tais valores na dosagem de concretos. Também, aplicou-se essa proporção pelo fato de favorecer a resistência à compressão da matriz, além de potencializar a retração por secagem da mesma.

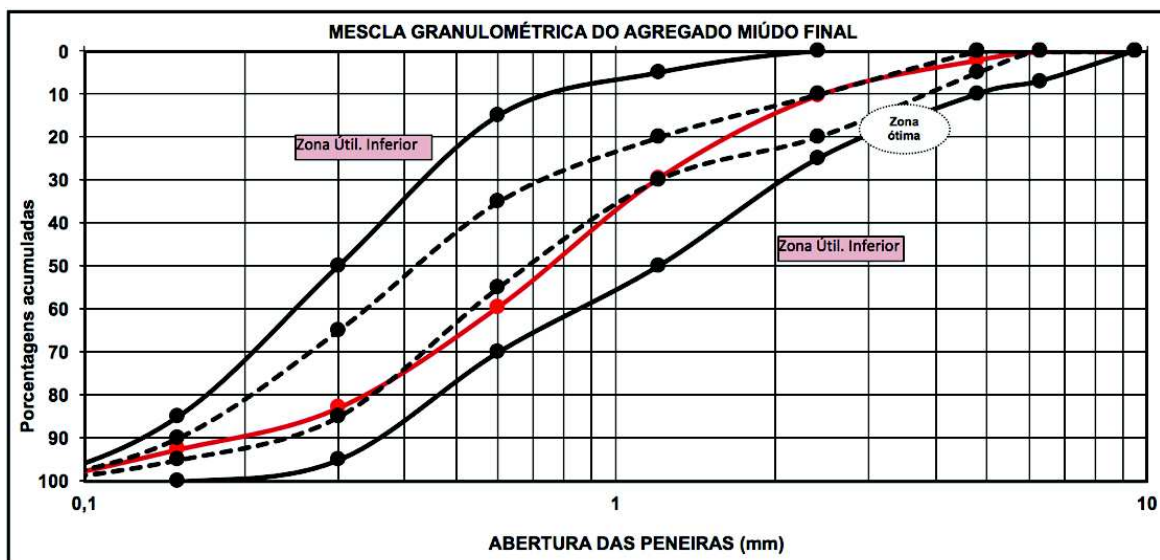
A extração dos materiais foi efetuada no rio Jacuí-RS. Realizaram-se os ensaios de massa específica das areias, a partir da ABNT NBR NM 52:2009, correspondendo a 2,60 g/cm³ para a areia média e 2,55 g/cm³ para a areia fina. A massa unitária da areia média foi igual a 1,49 g/cm³, baseada na ABNT NBR NM 45:2006 e, da areia fina, de 1,41 g/cm³. A determinação da composição granulométrica dos agregados seguiu o método prescrito pela ABNT NBR NM 248:2003 e é mostrada na Tabela 5. A curva granulométrica da mescla final das areias está representada na Figura 22, conforme estipula a ABNT NBR 7211:2009.

Tabela 5 – Composição granulométrica dos agregados miúdos

Peneira (mm)	Areia fina		Areia média		Mescla
	Retida (%)	Acumulada (%)	Retida (%)	Acumulada (%)	Acumulada (%)
6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4,8	0,0	0,0	2,4	2,4	1,9
2,4	2,0	2,0	9,8	12,2	10,2
1,2	8,3	10,3	22,1	34,3	29,5
0,6	33,8	44,1	28,9	63,2	59,4
0,3	26,0	70,1	22,9	86,1	82,9
0,15	20,7	90,8	6,9	93,0	92,6
Fundo (<0,15)	9,2	100,0	7,0	100,0	100,0
Módulo de finura	2,17		2,91		2,77
Dimensão máxima	2,4 mm		4,8 mm		4,8 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Composição granulométrica da areia final



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo adotado para a realização da pesquisa foi classificado como pedrisco de origem basáltica. O material foi coletado na cidade de Bom Princípio/RS. A escolha desse material provém dos requisitos estipulados pela ASTM C1581/1581M:2009 para o ensaio de retração restringida pelo método do anel, a qual delimita a dimensão máxima do agregado em 13 mm.

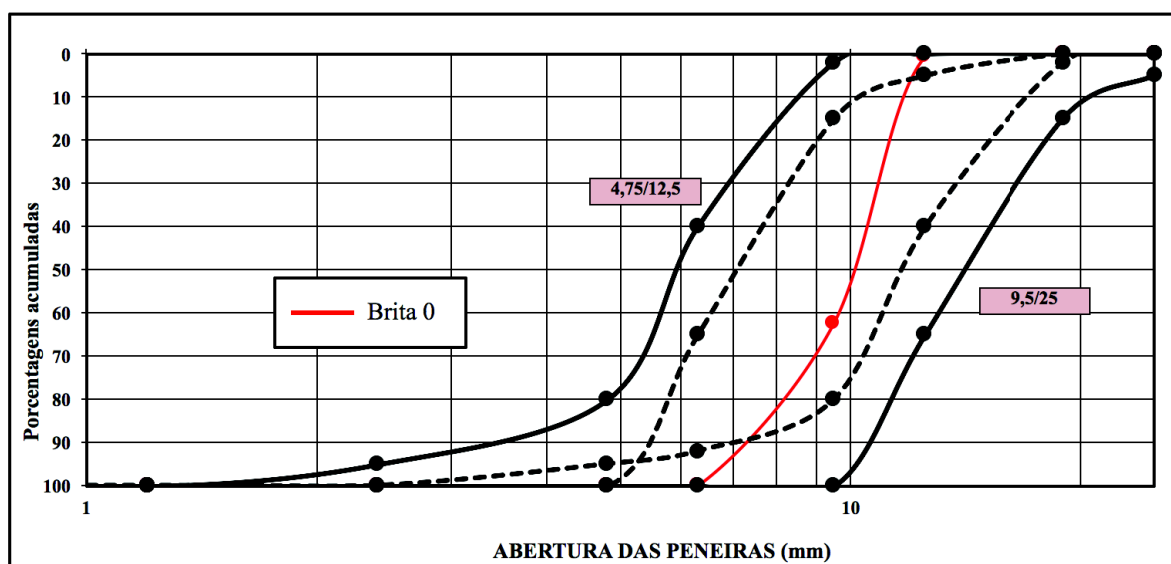
Os ensaios de caracterização do material foram feitos seguindo a ABNT NBR NM 45:2006, a qual descreve o método para determinação da massa unitária do agregado graúdo; e ABNT NBR NM 53:2003, que determina os parâmetros para obtenção da massa específica. Os valores encontrados para massa unitária e específica do agregado graúdo foram, respectivamente, 1,44 g/cm³ e 2,85 g/cm³. A composição granulométrica do agregado foi determinada através da ABNT NBR NM 248:2003 e ABNT NBR 7211:2009, estando expressa na Tabela 6 e Figura 23.

Tabela 6 – Composição granulométrica do agregado graúdo

Peneira (mm)	Agregado graúdo (#<12,5mm)	
	Retida (%)	Acumulada (%)
25,0	0	0
19,0	0	0
12,5	0	0
9,5	0,6	0,6
6,3	29,1	29,7
4,8	32,7	62,4
Fundo (<4,8)	37,6	100
Módulo de finura	6,63	
Dimensão máxima	9,5 mm	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Curva granulométrica do agregado graúdo

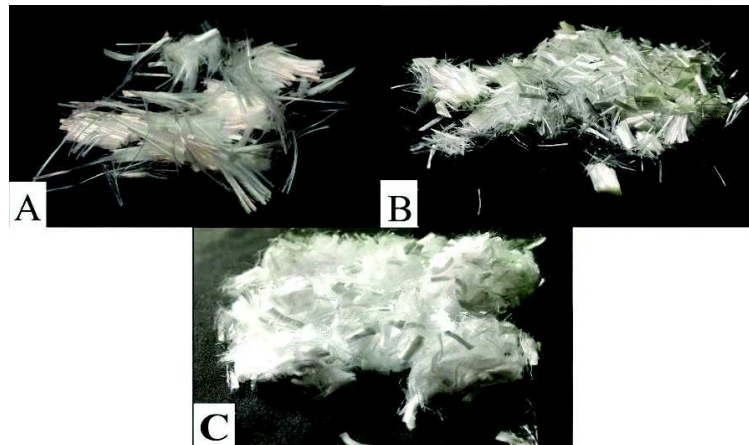


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3.4 Fibras

A elaboração dos compósitos contou com a utilização de três tipos de microfibras, de PP, PVA e poliéster (POL). A microfibra reciclada de POL teve de ser cortada manualmente, visto que as demais já vinham prontas do processo de fabricação. A Figura 24 ilustra as microfibras poliméricas.

Figura 24 – Microfibras poliméricas utilizadas para a confecção dos compósitos



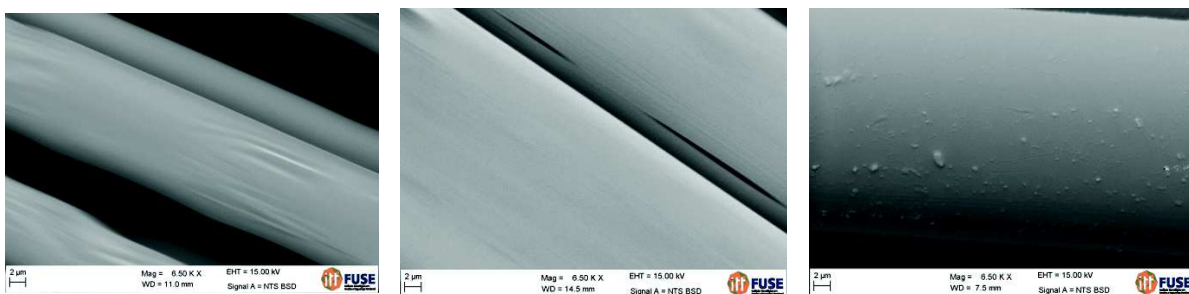
Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (A) microfibras recicladas de POL; (B) microfibras de PVA; (C) microfibras de PP.

As microfibras de PVA possuem produção no Japão, portanto foi necessário importá-las para o desenvolvimento do estudo. A superfície do material é lisa, de formato reto e sem ancoragem nas extremidades. As microfibras de PP, introduzidas na pesquisa, são produzidas no Brasil, possuem superfície lisa e de formato reto. As microfibras recicladas de poliéster (POL) são materiais reciclados utilizados na fabricação de cordas para ancoragem de navios e plataformas petrolíferas. Sua confecção foi feita na cidade de São Leopoldo/RS. A matéria prima da pesquisa foi retirada do miolo das cordas, o qual confere as propriedades mecânicas do elemento. A fibra não é comercializada e foi concebida para avaliar o seu desempenho como reforço em concretos.

Com o intuito de visualizar a superfície de cada reforço utilizado na pesquisa, realizou-se o ensaio de microscopia eletrônica de varredura, tendo os resultados apresentados na Figura 25.

Figura 25 – Conformação superficial de cada microfibra



Polipropileno (PP)

Álcool polivinílico (PVA)

Poliéster (POL)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As imagens obtidas evidenciaram as condições superficiais de cada material. Nota-se que os reforços utilizados na pesquisa possuem superfície lisa, sem a presença de anomalias ou pontos de alta rugosidade. Assim, comprova-se as informações do fabricante do material, tanto em questão do acabamento da superfície, quanto nas dimensões do mesmo.

As informações sobre as microfibras utilizadas na pesquisa estão expressas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades das microfibras estudadas

Propriedades	Poliéster* (POL)	Polipropileno (PP)	Álcool Polivinílico (PVA)
Diâmetro	38 μm	12 μm	26 μm
Comprimento	40 mm	6 mm	6 mm
Fator de forma	1053	500	231
Resistência à tração	700 MPa	400 MPa	1600 MPa
Módulo de elasticidade	8 GPa	5 GPa	39 GPa
Densidade	1,40 g/cm ³	0,91 g/cm ³	1,30 g/cm ³

Fonte: Elaborado pelos fabricantes; adaptado pelo autor.

* as informações contidas são referentes às microfibras novas de poliéster.

Verifica-se na Tabela 7 a diferença das propriedades físicas, mecânicas e geométricas dos reforços poliméricos. Destaca-se o comprimento de cada fibra, sendo as de PP e PVA igual a 6 mm e as recicladas de poliéster igual a 40 mm. O comprimento foi determinado devido a dificuldade encontrada no processo de corte das microfibras recicladas de poliéster. O corte foi feito manualmente, não sendo possível atingir a dimensão máxima de 6 mm. Nessas circunstâncias, o comprimento mínimo atingido foi de 40 mm de comprimento. Caso o corte das mesmas fosse feito industrialmente, o comprimento mínimo processado seria 100 mm.

A escolha dos reforços foi realizada levando em consideração os resultados que cada reforço apresentou nas pesquisas. As microfibras de recicladas de POL podem proporcionar resultados satisfatórios em concretos, quando avaliada a retração por secagem restringida e a idade de fissuração do compósito cimentício. Já a adoção de microfibras de PP foi referida devido à grande demanda de mercado e aplicabilidade em pesquisas acadêmicas.

As microfibras de PVA mostraram uma mudança de paradigma quando relacionadas ao comportamento dos reforços poliméricos em matrizes cimentícias. Por consequência das suas propriedades mecânicas e físicas, as microfibras de PVA vêm sendo estudadas e mostram-se uma boa alternativa como reforço para concretos.

3.3.5 Aditivo químico

A elaboração da pesquisa contou com o uso de aditivo químico na dosagem dos concretos com microfibras, a fim de melhorar as propriedades no estado fresco da mistura. O aditivo aplicado foi classificado como superplastificante à base de policarboxilatos, sendo denominado como Powerflow 1180 e fabricado pela empresa MC Bauchmie Ltda. A produção e controle desse material seguiu os procedimentos da ABNT NBR 11768:2011 e ABNT NBR 10908:2008. A caracterização química do aditivo é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Composição química do aditivo superplastificante para concreto

Componentes	Valor
Teor de Sólidos	34,02%
Densidade de líquido	1,08 g/cm ³
pH	6,72
Cor	Castanho claro

Fonte: Elaborado pelo fabricante; adaptado pelo autor

3.4 Proporcionalamento dos materiais

A constituição do traço utilizado na pesquisa foi concebida com o intuito de potencializar a retração por secagem da matriz. A proporção dos materiais foi definida, aplicando o método de dosagem do IBRACON (TUTIKIAN; HELENE, 2011) e utilizando a ABNT NBR 12655:2015.

A composição granulométrica e proporção dos agregados foi equivalente para cada mistura, a fim de fixar a quantidade de vazios nas matrizes confeccionadas. A proporção entre materiais foi de 1: 1,75: 2,25 (cimento; areia; brita), em massa. O consumo de cimento foi equivalente a 400 kg/m³ e o teor de argamassa e a relação água/cimento, respectivamente, 55% e 0,58.

A especificação de elevar o teor de água na mistura ocorreu devido as consequências que esse consumo gera nas propriedades físicas da matriz cimentícia, sendo uma delas o aumento da retração por secagem. Ainda, o alto consumo de cimento e a adoção de agregados com menores dimensões majoram a retração. Além do mais, a utilização de pedrisco como agregado graúdo também propiciou maior movimentação da pasta, visto que sua rigidez geométrica é menor em relação aos agregados com maiores dimensões.

Para efeitos de controle de propagação de fissuras, diminuição e distribuição de tensões internas de tração, adotou-se um teor de microfibras equivalente a 0,50%, em relação

ao volume de materiais secos. Os concretos reforçados com microfibras isoladas foram estudados na etapa 1, para determinar as melhores proporções de hibridização entre os reforços na etapa 2. A Tabela 9 apresenta o traço referência utilizado e a quantidade de cada reforço por metro cúbico.

Tabela 9 – Proporção dos materiais para confecção do traço estipulado na pesquisa

Materiais	Proporção	Quantidade (kg/m³)
Cimento	1	400
Agregado miúdo	1,75	700
Agregado graúdo	2,25	900
Água	0,60	240
Fibras POL	0,005	7,00
Fibras PP		4,55
Fibras PVA		6,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (POL) poliéster; (PP) polipropileno); (PVA) álcool polivinílico.

Verifica-se que as quantidades de fibras por metro cúbico são superiores aos valores usualmente aplicados no mercado. Geralmente, tais quantidades de mercado permanecem na faixa de 300 a 1200 g/m³ de fibras poliméricas, que em algumas situações não atingem o objetivo definido. Os teores praticados pelo mercado têm como objetivo mitigar fissuras superficiais causadas pela retração plástica do concreto. Porém determinados teores podem mostrar ineficiência na contenção de fissuras formadas na retração por secagem do concreto, a qual ocorre ao longo do tempo. A especificação dos teores ideais são dependentes das condições em que o elemento a ser reforçado encontra-se, estando exposto às variações de temperatura e vento ou simplesmente estando confinadas em um ambiente. Todavia, com os valores da pesquisa, pretende-se proporcionar melhores desempenhos físicos e mecânicos à matriz.

3.4.1 Mistura

A escolha do misturador foi baseada na sua capacidade volumétrica, facilidade funcional, cumprimento dos parâmetros experimentais normativos e pelo desempenho nos processos de homogeneização dos materiais. Sendo assim, foi especificado um misturador de eixo vertical com volume de 150 litros.

O processo sequencial de mistura dos constituintes foi:

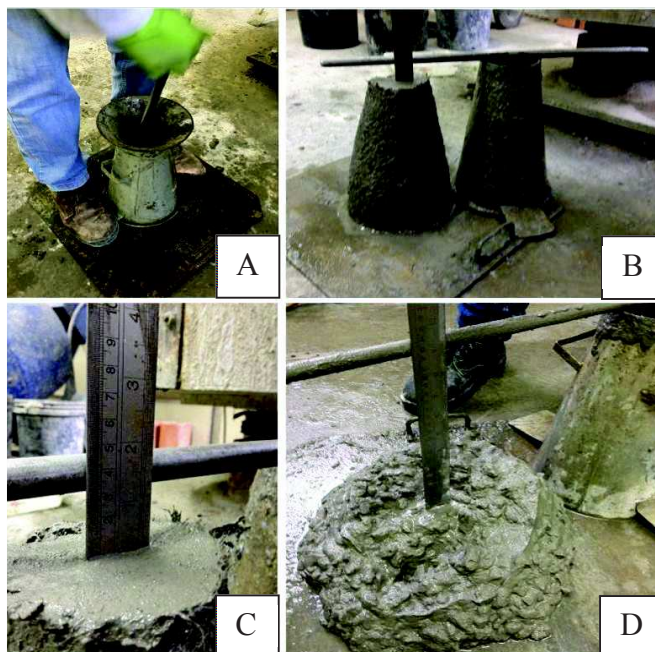
- Adição de 100% do agregado graúdo na betoneira vertical com velocidade constante, misturando por 1 minuto;

- Adição de 40% da água total, processando a rotação por 30 segundos;
- Adição de 100% do cimento e de 40% da água total para a mistura, deixando os materiais serem homogeneizados por 2 minutos;
- Adição de 100% do agregado miúdo, homogeneizando por 1 minutos;
- Adição da quantidade restante de água, fazendo com que o material seja misturado por um intervalo de 2 minutos;
- Finalizando o processo de mistura dos materiais, iniciou-se a inserção das fibras com a rotação do misturador em velocidade constante. Após a adição de 100% das fibras, misturam-se os materiais por 3 minutos juntamente com a inserção do aditivo químico superplastificante;
- Com o compósito finalizado, realizam-se o ensaio de abatimento de tronco de cone e VeBe e, posteriormente, a moldagem dos corpos de prova para os ensaios.

3.4.2 Trabalhabilidade

Para a definição da consistência dos concretos, foi realizado o ensaio de tronco de cone (vide Figura 26), seguindo a ABNT NBR NM 67:1998, para que o abatimento do concreto referência (sem fibra) atingisse a classe S220, conforme a ABNT NBR 7212:2012. Já para os concretos com inserção de microfibras, a classe de abatimento especificada foi a S50, de acordo com a ABNT NBR 7212:2012. Para que os compósitos com fibras atingissem essa exigência, adotou-se o uso de aditivo superplastificante, mantendo constante a quantidade de água das misturas.

Figura 26 – Procedimento de ensaio de abatimento nos compósitos estudados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (A) adensamento da mistura no molde tronco cônico; (B) aspecto do CRF após ensaio de abatimento pelo método tronco de cone; (C) conferência do abatimento no CRF após ensaio de abatimento pelo método tronco de cone; (D) aspecto e conferência do abatimento do concreto sem fibras após ensaio de abatimento pelo método tronco de cone.

Além do ensaio de abatimento pelo método de tronco de cone, foi realizado o ensaio de VeBe, conforme especifica o ACI 211.3R-02:2009. Esse método determina o grau de facilidade de adensamento de uma matriz com e sem fibras, por meio do tempo necessário para que seja compactada via ação dinâmica. Quanto maior o tempo, menor é a trabalhabilidade da matriz e, conseqüentemente, maior o índice VeBe. A classificação da consistência do teste é expressa na Tabela 10.

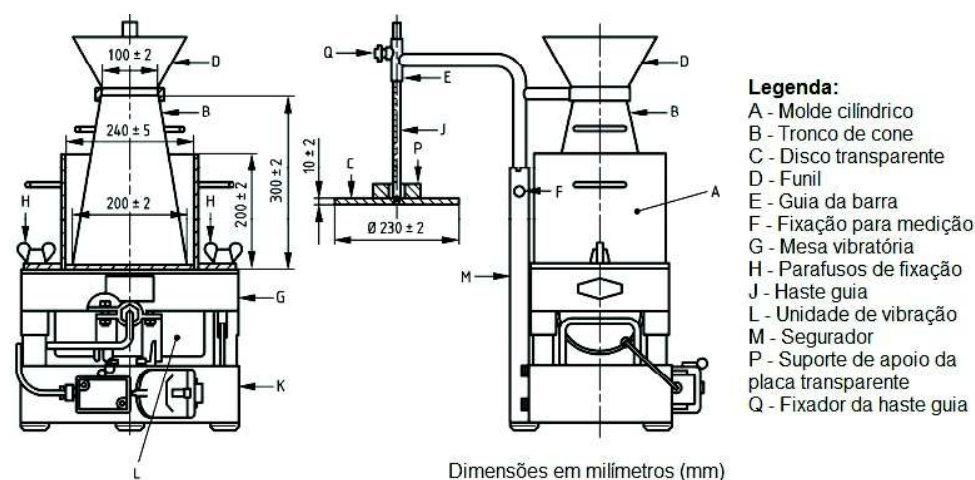
Tabela 10 – Classificação de consistência pelo ensaio de VeBe

Classificação	Abatimento do tronco de cone (mm)	Índice de VeBe (s)
Extremamente seco	-	32 a 18
Muito rígido (mantém formato)	-	18 a 10
Rígido	0 a 25	10 a 5
Pouco fluido	25 a 75	5 a 3
Fluido	75 a 125	3 a 0
Muito fluido	125 a 190	-

Fonte: ACI 211.3R-02 (2009, p.2); adaptado pelo autor.

A Figura 27 ilustra o instrumento utilizado para o ensaio de Vebe.

Figura 27 – Especificações dos equipamentos para o ensaio de VeBe



Fonte: BS EN 12350-3 (2009, p. 10); adaptado pelo autor.

Os ensaios de abatimento do tronco de cone e VeBe foram realizados em todos os concretos antes e depois da inserção do aditivo superplastificante. Assim é possível determinar o impacto dos reforços na consistência da matriz referência.

3.4.3 Moldagem, adensamento e cura

No ensaio de retração restringida pelo método do anel, a moldagem foi feita através de fôrmas circulares, formando um anel de concreto, como estabelece a ASTM C1581/1581M:2009. A confecção das amostras procedeu-se através da inserção da mistura entre as duas fôrmas de aço, sendo uma interna e outra externa, conforme Figura 28.

Figura 28 – Montagem do sistema de fôrmas para a confecção dos anéis de concreto

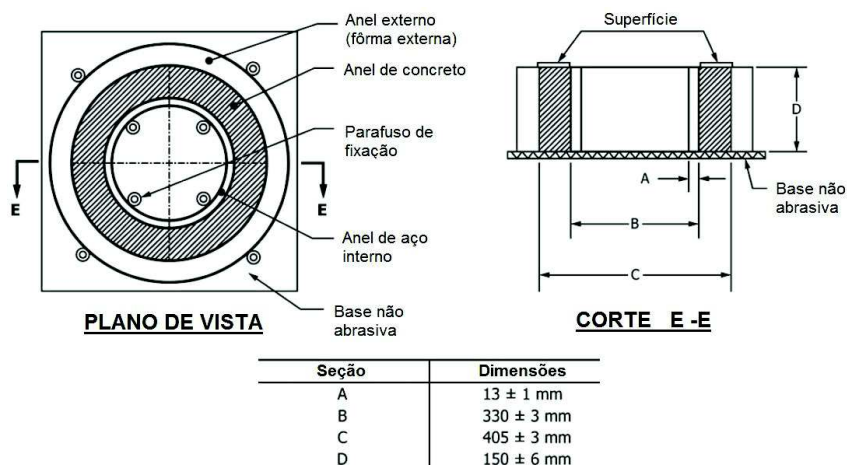


Fonte: Elaborado pelo autor.

As medidas do molde interno: 330 ± 3 mm de diâmetro externo com altura de 150 ± 6 mm e uma espessura de 12,5 mm. Já o molde externo: 405 ± 3 mm de diâmetro interno com altura

de 150 ± 6 mm e espessura de 1 mm, como ilustra a Figura 29. O aço utilizado para a confecção das fôrmas interna e externa foi, respectivamente, AISI 1010 e ASTM A36. Ambas as fôrmas apresentaram superfícies lisas e impermeáveis.

Figura 29 – Dimensões dos moldes para ensaio de anel

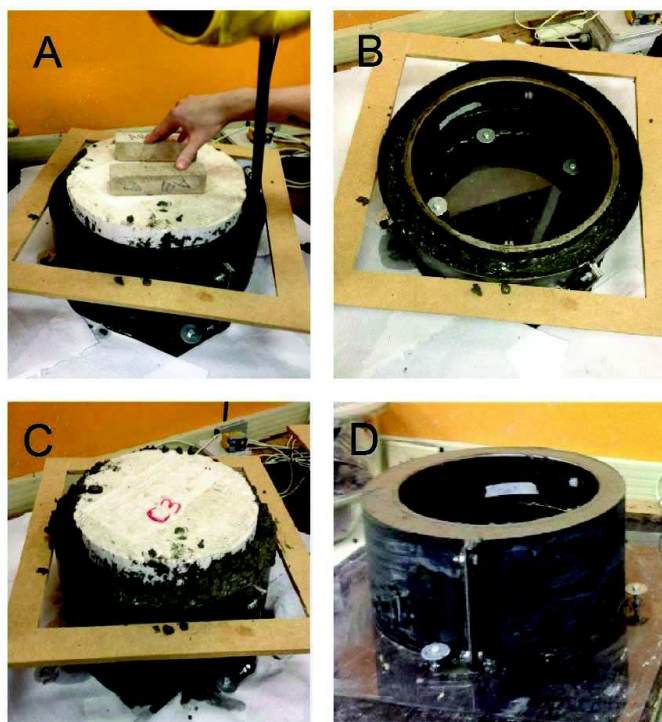


Fonte: ASTM C1581/1581M (2009, p.3); adaptado pelo autor.

Assim como as fôrmas circulares, a base de apoio também deve ser impermeável e lisa, diminuindo o atrito entre a amostra e a base. Utilizou-se como base uma placa de vidro com 5 mm de espessura e dimensões de 600 x 600 mm.

Antes de iniciar o processo de concretagem, foi aplicado óleo desmoldante nas fôrmas e na base de apoio, facilitando o processo de retirada do molde externo. A inserção do concreto foi feita de maneira manual, assim como o adensamento do mesmo. A compactação foi executada em duas camadas, golpeando 75 vezes cada camada através de uma haste metálica de 10 mm de diâmetro (vide Figura 30), seguindo procedimento da ASTM C1581/1581M. Ao final do adensamento, a superfície da amostra foi regularizada, retirando qualquer excesso de material na superfície, no interior do anel e ao longo da periferia da amostra.

Figura 30 – Procedimento de moldagem das amostras para o ensaio de retração restringida



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (A) adensamento manual utilizando haste metálica; (B) primeira camada de concreto já adensada; (C) segunda camada de concreto já adensada; (D) regularização e limpeza da superfície da amostra.

A cura das amostras, como recomenda a ASTM C1581/1581M:2009, foi feita em sala climatizada com controle de temperatura e umidade. As condições do ambiente de ensaio foram com 23 ± 2 °C para temperatura e $50 \pm 4\%$ de umidade.

A moldagem dos corpos de prova de concreto para o ensaio de resistência à compressão axial seguiu a ABNT NBR 5738:2015. As fôrmas cilíndricas possuem altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm. O adensamento do material na fôrma foi realizado de maneira manual, utilizando uma haste metálica específica para adensamento. O material foi adensado em 2 camadas, aferindo 12 golpes em cada. Ao final do adensamento, regularizou-se a superfície das amostras. O processo de cura dos corpos de prova foi dividido em duas partes. Uma delas, denominada cura 1 (C1), seguiu as recomendações estipaladas pela ABNT NBR 5738:2015; já a cura 2 (C2) seguiu as condições do ensaio de anel, ou seja, 23 ± 2 °C para temperatura e $50 \pm 4\%$ de umidade.

Para o ensaio de tração na flexão e tenacidade, as dimensões adotadas às amostras são recomendadas pela norma JSCE – SF4:1984, de 150x150x500 mm, de acordo com a Figura 31. O processo de moldagem das amostras prismáticas seguiu as recomendações da ABNT NBR 5738:2015. As amostras foram adensadas manualmente em duas camadas com 75 golpes

em cada. A cura das amostras seguiu os parâmetros estipulados aos corpos de prova do ensaio de retração restringida, ou seja, denominado cura 2 (C2).

Figura 31 – Moldes para confecção das amostras prismáticas



Fonte: Acervo do autor.

3.5 Seleção de ensaios

Os ensaios necessários para o programa experimental foram planejados a fim de obter valores em conformidade com os objetivos propostos. Os ensaios adotados para execução da pesquisa foram explicados ao longo dos seguintes itens.

3.5.1 Ensaio de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Para determinação da resistência à compressão dos concretos, aplicou-se o método, a instrumentação e as dimensões do corpo de prova conforme a ABNT NBR 5739:2007, e realizados no Laboratório de Segurança Estrutural (LaSE) do Instituto Tecnológico em Desempenho e Construção Civil (itt Performance - Unisinos). A velocidade de carregamento para os ensaios de compressão foi de 0,45 MPa/s.

Antes de iniciar os ensaios as superfícies de contato de cada amostra foram retificadas, para garantir distribuição uniforme da carga na superfície das amostras. Ainda, o diâmetro e a altura das amostras foram mensurados e anotados.

O ensaio de módulo de elasticidade foi feito conforme a ABNT NBR 8522:2008. Através dos resultados, tendo como eixos a deformação específica e tensão aplicada, determinou-se o módulo de elasticidade. Para a obtenção dos valores de módulo de elasticidade das misturas, foi seguida a Equação 1.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Equação 1

Onde:

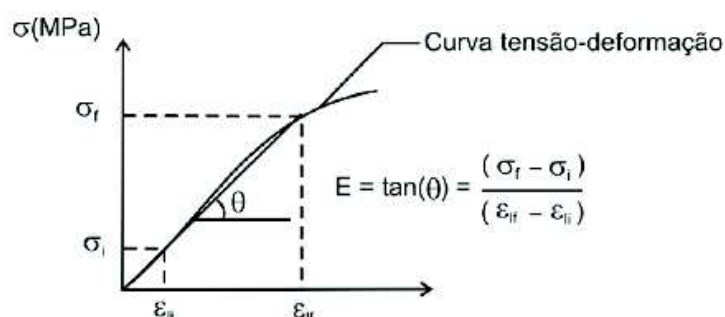
σ = tensão (MPa);

E = módulo de elasticidade (GPa);

ε = deformação específica (mm/m).

A Figura 32 ilustra a interpretação dos resultados graficamente.

Figura 32 – Representação esquemática para cálculo do módulo de elasticidade



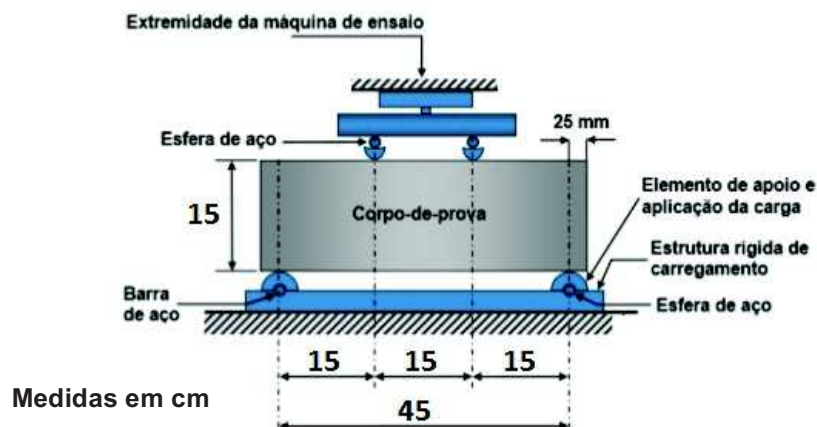
Fonte: ABNT NBR 8522 (2008, p. 2).

3.5.2 Ensaio de resistência à tração na flexão e fator de tenacidade

A determinação da resistência à tração na flexão dos compósitos seguiu os procedimentos prescritos na Japan Society of Civil Engineers (JSCE – SF4, 1984). Esse ensaio prevê a aplicação de carga em 4 pontos de uma amostra prismática. Tendo a carga total aplicada e o vão teórico conhecido, é possível calcular a resistência à tração do material.

Após o ensaio de tração, foi definido o fator de tenacidade das misturas avaliadas. Seguindo os preceitos descritos pela Japan Society of Civil Engineers (JSCE – SF4, 1984), empregou-se a instrumentação ilustrada na Figura 33.

Figura 33 – Esquema utilizado para realização do ensaio de tração na flexão



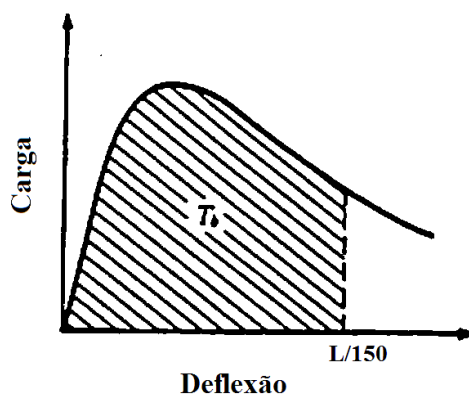
Fonte: Elaborado pelo autor.

A norma JSEC SF4:1984 determina que a amostra deve ser analisada utilizando deslocamento prescrito. A velocidade de ensaio é dependente das dimensões do exemplar, sendo determinada pelo resultado da divisão do vão teórico (L) por 1500. Nesse caso, foi utilizada a velocidade de 0,3 mm/min, visto que o vão teórico da amostra foi de 450 mm

À medida em que avançam os deslocamentos no ensaio, é necessária a mensuração das deflexões apresentadas pela amostra. Tais deflexões são mensuradas no eixo vertical da amostra prismática por deflectômetros eletrônicos.

A deflexão máxima para caracterização da amostra no ensaio de tenacidade é obtida por meio do resultado da divisão do vão teórico (L) por 150. Com isso, a deflexão máxima utilizada no ensaio foi de 3 mm. A Figura 34 apresenta a área formada abaixo da curva originada pela carga e deflexão do compósito, sendo utilizada para a determinação do seu fator tenacidade, de acordo com a JSCE SF4:1984.

Figura 34 – Determinação do fator de tenacidade pelo gráfico carga vs deflexão



Fonte: JSCE SF4 (1984, p. 61); adaptado pelo autor.

O cálculo do fator de tenacidade de cada mistura analisada seguiu a Equação 2.

$$FT = \frac{Tb}{\delta Tb} \times \frac{Lv}{bv \cdot hv^2}$$

Equação 2

Onde:

FT = fator de tenacidade (kgf/cm²);

Tb= área sob a curva até o deslocamento equivalente de L/150 (mm²);

δTb = deslocamento equivalente a L/150 (mm);

bv= largura da viga (mm);

hv = altura da viga (mm);

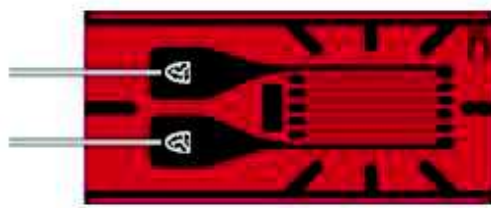
Lv= vão da viga durante o ensaio (mm).

3.5.3 Ensaio de retração por secagem restringida

O ensaio de retração por secagem restringida seguiu os parâmetros descritos pela ASTM C1581/1581M:2009. O método é conhecido como ensaio de anel ou *ring test* e promove a identificação do potencial de fissuração e deformações de uma matriz quando submetida a retração. Tendo as deformações ocorrendo em escalas micrométricas, a ASTM C1581/1581M:2009 determina a utilização de extensômetros elétricos para a detecção das deformações do núcleo.

Os extensômetros representam uma resistência elétrica confeccionada a partir de filamentos dispostos paralelamente entre si, conforme Figura 35. A captação das deformações é feita a partir da variação dos valores emitidos pelos extensômetros.

Figura 35 – Extensômetro utilizado na pesquisa (KYOWA KFG-30-120-C1-11)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ligado aos extensômetros há um equipamento de aquisição de dados para coleta dos resultados emitidos pela resistência elétrica. Visto que a funcionalidade do sistema

necessita de uma plataforma de interface, utilizou-se o software CATMAN AP para calibrar e configurar os dados coletados. Na pesquisa empregou-se o equipamento de aquisição de dados denominado QuantumX modelo MX840B, fabricado pela empresa HBM, ligado ao computador e controlado pelo software, conforme ilustra a Figura 36.

Figura 36 – Equipamento de aquisição de dados utilizado na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

A instalação dos extensômetros elétricos foi feita na face interna do núcleo metálico. Assim, foi possível determinar a deformação específica direta exercida sobre o anel metálico interno. A Figura 37 mostra os corpos de prova instrumentados.

Figura 37 – Instrumentação completa do sistema de aquisição de dados



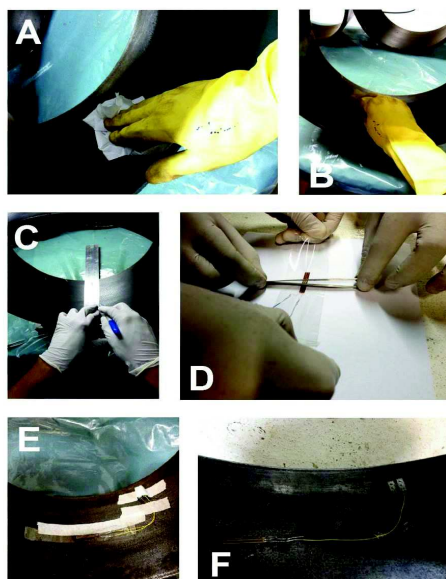
Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto para a medição é definido pela ASTM C1581/1581M:2009, como sendo na metade da altura do núcleo metálico. O local de medição garante maior precisão nos resultados, pois quanto mais próximos das extremidades do núcleo, base e superfície, maior será a influência de variáveis, como a perda de umidade para o ambiente e o possível atrito pelo contato da amostra com a base.

A instrumentação completa dos equipamentos foi realizada logo após o término de cada concretagem. Entretanto, conforme indica a Figura 38, o processo de colagem dos

extensômetros elétricos nas fôrmas metálicas foi feita uma única vez, um dia antes da primeira concretagem, assim respeitando o período mínimo de cura da cola. Com isso, nas demais concretagens e ensaios, não foi necessário realizar novamente o procedimento de colagem dos extensômetros.

Figura 38 – Procedimento de colagem dos extensômetros



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (A) limpeza da face interna do anel metálico com álcool isopropílico; (B) desgaste superficial do anel metálico; (C) marcação do ponto de colagem; (D) uso de fita adesiva para facilitar colagem do *strain gage*; (E) colagem do *strain gage*; (F) instrumentação completa.

O potencial de fissuração de cada amostra foi determinado seguindo os parâmetros prescritos pela ASTM C1581/1581M:2009, basendo-se nos valores das deformações obtidas em cada ensaio de anel. Com os resultados foi possível classificar a mistura frente o seu potencial de fissuração. A Tabela 11 ilustra os valores limitantes para a classificação dos materiais

Tabela 11 – Classificação para o potencial de fissuração

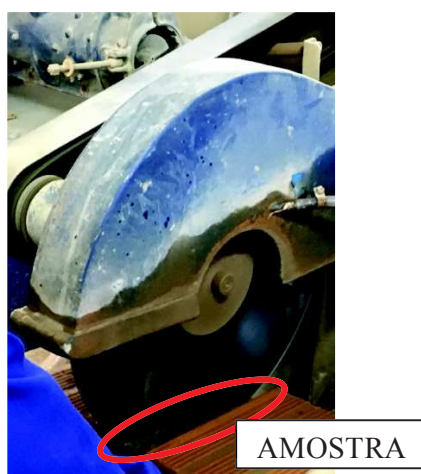
Tempo para Fissuração (Dias)	Taxa Tensão Média, S (MPa/dia)	Taxa Tensão Média, S (psi/dia)	Potencial de Fissuração
$0 < t_{fis} \leq 7$	$q \geq 0,34$	$q \geq 50$	Alto
$7 < t_{fis} \leq 14$	$0,17 \leq q < 0,34$	$25 \leq q < 50$	Moderado-alto
$14 < t_{fis} \leq 28$	$0,10 \leq q < 0,17$	$15 \leq q < 25$	Moderado-baixo
$t_{fis} > 28$	$q < 0,10$	$q < 15$	Baixo

Fonte: ASTM C1581/1581M (2009, p.6); adaptado pelo autor.

3.5.4 Quantificação do teor de agregado graúdo

Os ensaios de quantificação do teor de agregado graúdo procederam-se após o término das análises da retração por secagem pelo método do anel restringido. Com isso, foram selecionadas duas seções de cada exemplar anelar. As áreas de análise encontravam-se próximas aos pontos de medição de deformação para analisar comparativamente as ações da contração da amostra. Os exemplares foram serrados em duas partes no sentido longitudinal com o auxílio de uma serra de precisão, conforme Figura 39. Essa ação facilitou a visualização da distribuição interna dos materiais no concreto.

Figura 39 – Processo de corte das seções analisadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o corte das seções de cada amostra anelar, capturou-se uma imagem da seção longitudinal do elemento retalhado e quantificou-se a área total de agregados. Para auxiliar na quantificação, utilizou-se o software AutoCad 2015, obtendo o formato e a área total de agregado graúdos presentes na imagem analisada, conforme Figura 40. Após obter os valores, relacionou-se a área total da seção com a área total de agregados graúdos presentes, obtendo a porcentagem desses materiais. Para cada compósito, realizou-se a análise de 6 seções. Por fim, para obter o teor de agregados graúdos em cada mistura, fez-se uma média dos valores encontrados.

Figura 40 – Processo de quantificação do teor de agregados graúdos nas misturas analisadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A caracterização física das fibras foi realizada a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando o equipamento ilustrado na Figura 41. Além da parametrização das fibras, foi possível identificar falhas de concretagem e a zona de interface entre o reforço e a matriz. Esse sistema permite trabalhar em escala micrométrica, facilitando a visualização dos materiais.

Figura 41 – Instrumentação aplicada para a caracterização dos compósitos e fibras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esse ensaio foi possível avaliar a estrutura de materiais, tanto metálicos quanto não metálicos e identificar a composição química do mesmo. Materiais não metálicos necessitam ser processados por metalização. Nesse processo utilizou-se o ouro, visto que, com a metalização, os elétrons refletem mais facilmente quando entram em contato com a superfície da amostra.

3.5.5.1 Preparação da amostra para ensaio de MEV

Para realizar uma análise microestrutural satisfatória é imprescindível manter a integridade do compósito em estudo, a qual deve ser mantida e não sofrer variações morfológicas. Assim, adotou-se medidas de preparação das amostras com o uso de técnicas mais avançadas.

Com o intuito de analisar a zona de interface entre os reforços e a matriz, o processo de quebra e extração das amostras foi realizado por meio da criofratura. A amostragem referente a realização do ensaio de MEV correspondeu a 1 exemplar para cada compósito simples com fibras, os quais foram retirados dos anéis de retração restringida. Após a extração das amostras, as mesmas foram condicionadas em estufa com temperatura controlada de $80 \pm 2^\circ\text{C}$ até atingir massa constante. Após, as amostras permaneceram em um dessecador até o momento de realização do ensaio de MEV.

Tal procedimento foi escolhido pelo fato da zona de interface entre os reforços e a matriz ser muito sensível às variações de preparação. Dessa maneira, o sistema mantém suas propriedades quando rompido no estado de congelamento. A Figura 42 apresenta o procedimento de ensaio de criofratura nas amostras.

Figura 42 – Processo de criofratura nos concretos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Karp (2005), a técnica de criofratura é a alternativa mais indicada para a preparação de exemplares quando submetidos a análises microscópicas. No procedimento, é realizado o congelamento total do material e executa-se a quebra do elemento. No caso dessa pesquisa, foi utilizado nitrogênio líquido, com temperatura igual a -193°C . As amostras de

concreto foram imersas por um período de 1 minuto no nitrogênio líquido e após quebradas com o uso de pinças.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos na pesquisa de maneira segmentada, visto que o estudo foi composto por duas etapas, conforme detalhado no item 3.1. Os resultados obtidos foram apresentados por meio de tabelas, gráficos e figuras. A etapa 1 contemplou os resultados das matrizes com reforço de microfibras isoladas e a matriz referência. De posse dos resultados dos compósitos simples com microfibras em um teor de adição de 0,50% do volume total de materiais secos, definiram-se as proporções de hibridização das microfibras para um mesmo teor de adição total, as quais foram analisadas na etapa 2 da pesquisa.

4.1 Etapa I

O presente item contempla e discute os resultados do concreto referência e os reforçados com microfibras de polipropileno (PP), álcool polivinílico (PVA) e recicladas de poliéster (POL), tanto no estado fresco, quanto endurecido.

4.1.1 Propriedades no estado fresco (consistência)

A Tabela 12 apresenta os resultados dos ensaios de abatimento por tronco de cone e VeBe das misturas com e sem adição de aditivo superplastificante estudadas na etapa inicial da pesquisa.

Tabela 12 – Propriedades no estado fresco das matrizes estudadas na etapa 1

Compósito	Sem aditivo superplastificante		Com aditivo superplastificante		
	Abatimento (mm)	VeBe (s)	Teor de aditivo (%)	Abatimento (mm)	VeBe (s)
Referência	235	0,85	0	-	-
C-PP	30	8,90	0,74	60	4,80
C-PVA	35	4,00	0,41	55	2,10
C-POL	45	13,20	0,65	90	8,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Por meio dos dados relacionados na Tabela 12, evidencia-se que a inserção de fibras na matriz referência afetou sua consistência. Com abatimento inicial de 235 mm, os concretos com inserção de microfibras e sem aditivo sofreram uma redução de até 200 mm. Nos ensaios

de VeBe, o impacto foi ainda maior, partindo do aumento de tempo em torno de 9 vezes ao referencial.

Após a verificação das propriedades dos compósitos sem a adição de produtos químicos, adequaram-se os resultados com o uso de aditivo superplastificante para que as misturas atingissem a classe de abatimento S50. Para tal, utilizou-se como recurso a incorporação de aditivo superplastificante, alternativa também utilizada por Quinino (2015), de maneira desigual para cada mistura até que seu abatimento atingisse a classe referida S50. Em relação aos resultados iniciais, tanto de abatimento, quanto de VeBe, após a inserção do aditivo, praticamente dobraram-se os valores de consistência das misturas.

A Figura 43 ilustra o aspecto de cada compósito após o ensaio de abatimento por tronco de cone.

Figura 43 – Resultados do ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone nos concretos analisados



Concreto referência



C-PP



C-PVA



C-POL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Com base nas imagens apresentadas na Figura 43, constata-se que a aparência dos concretos é muito semelhante, apresentando distribuição homogênea das fibras, ausência de segregação, ausência de exsudação e boa aparência visual. A matriz com microfibras de PP e a com PVA obtiveram resultados muito próximos de abatimento por tronco de cone. Já o concreto com microfibras recicladas de POL atingiu o maior abatimento dentre os compósitos com fibras.

O compósito com melhores resultados no ensaio de VeBe foi o C-PVA, atingindo os menores tempos antes e após a inserção do aditivo superplastificante. O teor de adição de aditivo químico, nessa mistura, foi inferior aos demais. Comparando a mistura C-PP com a C-PVA, os resultados de abatimento de tronco de cone foram muito semelhantes, porém o ensaio de VeBe mostrou diferença considerável. Tal efeito pode ser explicado pela distribuição e morfologia dos reforços no interior da mistura, tendo as fibras de PVA menor área superficial e possuir um menor número de fibras por metro cúbico, quando comparadas às de PP. O consumo de aditivo químico foi cerca de 1,8 vezes maior para o C-PP, pois aumentam notoriamente a área superficial da mistura, evidenciando o bom desempenho das microfibras de PVA na matriz cimentícia.

Os comportamentos identificados nas misturas já eram esperados, posto que Ceccato (1998), Figueiredo (2000) e Quinino (2015) também comprovaram tal fato em suas pesquisas. Figueiredo e Ceccato (2015) comentam que fibras com dimensões maiores auxiliam nas propriedades mecânicas da mistura, todavia influem na perda de trabalhabilidade da mesma, devido a criação de uma malha no interior do compósito. Isso pode ser visto no concreto reforçado com microfibras recicladas de POL.

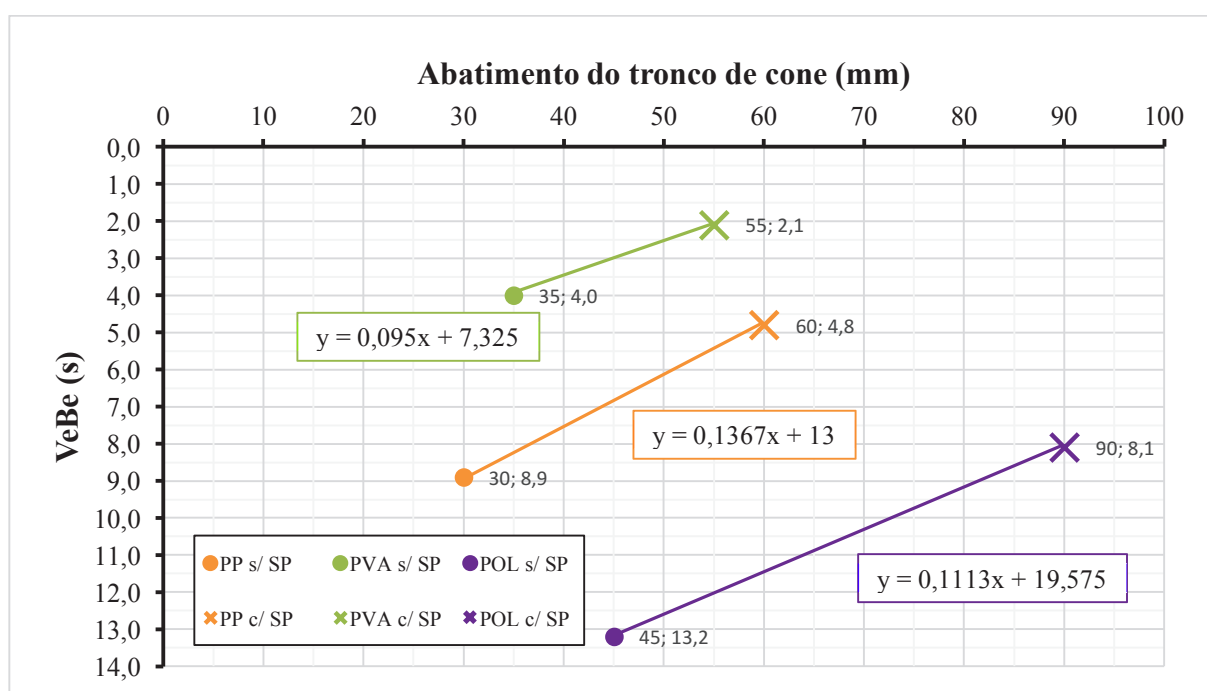
O fato da inserção de fibras afetar diretamente a fluidez da matriz é explicado pela restrição que os reforços impõem na mobilidade das partículas sólidas dispostas na mistura. (BANTHIA et al., 1995). Mangat e Swamy (1974) atestam que os agregados são os principais afetados, sendo a compatibilidade dimensional entre fibra e agregados grãos predominante nesse quesito. Bantia e Sheng (1996) confirmam que, além do intertravamento das partículas, a inserção de fibras aumenta a área de molhagem dos materiais. Normalmente, as fibras de maiores dimensões não impactam tanto na abatimento por tronco de cone da mistura quanto às microfibras. Todavia, com o uso de ensaios dinâmicos no estado fresco, como é o caso do VeBe, o efeito de cada reforço é invertido, tendo as fibras de menor dimensão uma maior influência, conforme resultados da Tabela 12.

A explicação para a diferenciação dos comportamentos nos ensaios dinâmicos está relacionada à facilidade de mobilização das fibras de menores dimensões no interior da matriz.

No caso das microfibras de PP e PVA, com comprimento igual a 6 mm, as dificuldades relacionadas a sua movimentação foram muito menores quando comparadas aos reforços mais alongados, como os de POL. Os reforços de POL tiveram os pontos de contato e restrição na mistura aumentados.

A Figura 44 retrata a correlação entre os resultados obtidos no ensaio de abatimento por tronco de cone e VeBe para os concretos com adição de microfibras antes e depois da inserção do aditivo químico superplastificante.

Figura 44 – Correlação entre os ensaios realizados no estado fresco (etapa 1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (s/ SP) sem aditivo superplastificante; (c/ SP) com aditivo superplastificantes; (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Observa-se que os compósitos com utilização de microfibras de PP e POL tiveram seus resultados mais impactados com a inserção do aditivo superplastificante, comprovados pelo ângulo de inclinação da reta. Já o concreto com microfibras de PVA sofreu menos influência na correlação abatimento e VeBe após a adição do superplastificante, todavia, essa matriz foi a que atingiu os melhores resultados de consistência antes da utilização do aditivo superplastificante. O concreto reforçado com microfibras de PVA também obteve boa aparência no teste visual, demonstrando homogeneidade e ausência de exsudação. Na verificação por meio de análises táteis, o concreto com fibras de PVA também foi o que se apresentou mais coeso e adequado para o uso.

Com base nos resultados, constatou-se a melhora das propriedades da matriz no estado fresco com a aplicação do aditivo superplastificante. Além disso, algumas misturas sofreram modificações na classificação de consistência, conforme apresenta a Tabela 13.

Tabela 13 – Classificação das misturas pré e pós adição do superplastificante

Compósito	Classificação abatimento		Classificação VeBe	
	Sem aditivo	Com aditivo	Sem aditivo	Com aditivo
Referência	S220	-	Fluido	-
C-PP	S10	S50	Rígido	Pouco fluido
C-PVA	S10	S50	Pouco fluido	Fluido
C-POL	S10	S50	Muito rígido	Rígido

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Baseando-se nos ensaios no estado fresco da mistura, verifica-se que, para os concretos reforçados com microfibras e com os materiais usados nessa pesquisa, o teste de abatimento de tronco de cone não é o mais recomendado, podendo ocultar a real consistência do compósito e inviabilizar a aplicação do mesmo. Já no ensaio de VeBe os valores são mais coerentes. Para Figueiredo e Ceccato (2015), o VeBe não é confiável para expressar a trabalhabilidade de um concreto reforçado com fibras, quando o mesmo apresenta abatimento superior a 100 mm. Para as misturas referidas na pesquisa, o ensaio de VeBe mostrou-se adequado.

4.1.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Os resultados da resistência à compressão axial foram obtidos nas idades de 7 e 28 dias em duas condições de cura, conforme apresenta a Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados da resistência à compressão dos concretos analisados na etapa 1

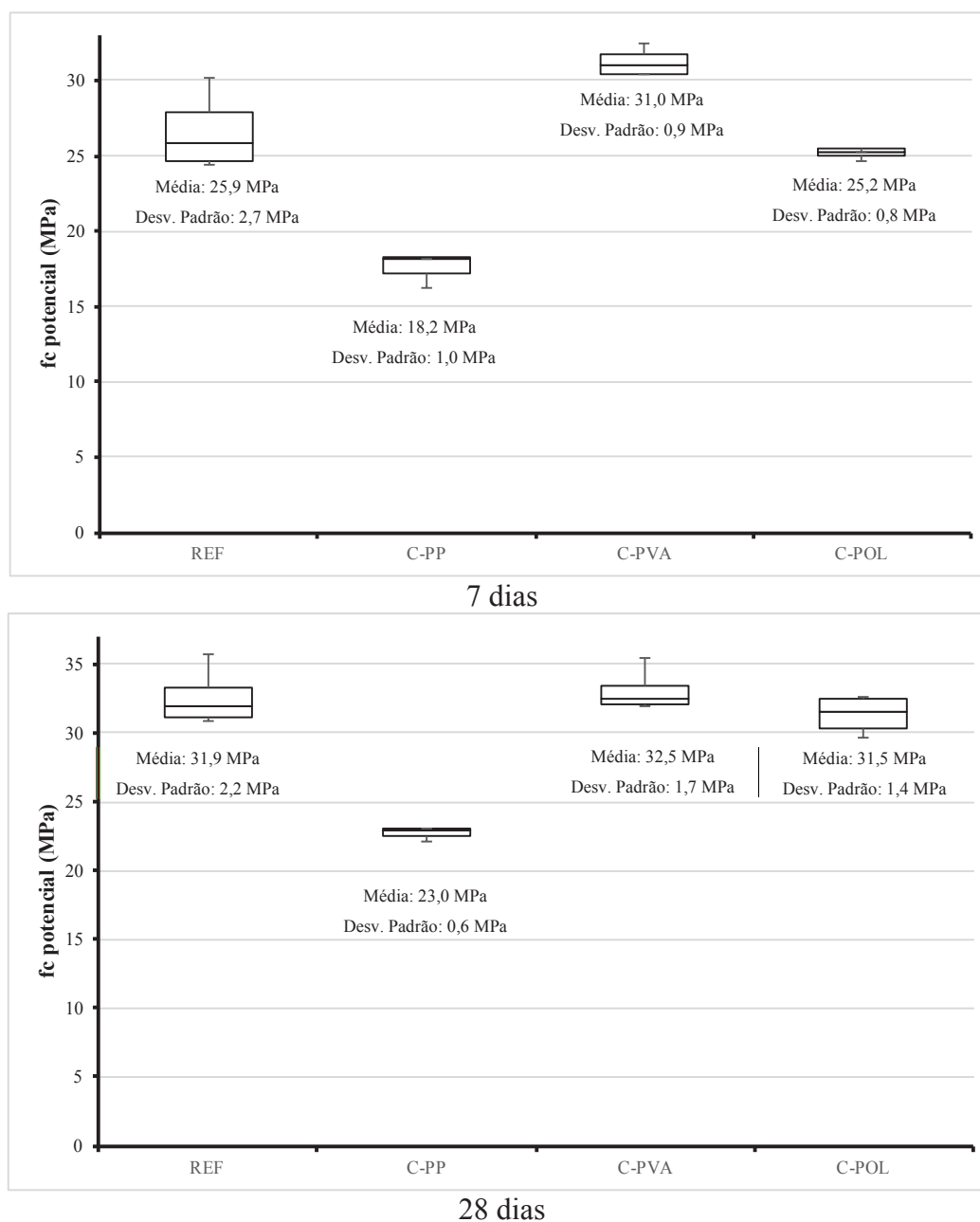
Compósito	Cura	Amostras	Resistência à compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
Referência	C1	1	30,2	35,7
		2	27,1	32,5
	C2	1	24,7	31,3
		2	24,4	30,9
C-PP	C1	1	18,2	23,1
		2	18,1	22,9
	C2	1	18,4	23,6
		2	16,2	22,1
C-PVA	C1	1	32,4	35,5
		2	31,5	32,8
	C2	1	30,5	32,1
		2	30,4	31,9
C-POL	C1	1	26,4	32,6
		2	25,2	30,6
	C2	1	25,2	32,4
		2	24,6	29,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C1) cura conforme ABNT NBR 5738:2015; (C2) cura conforme ensaio de anel; (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

A Figura 45 apresenta as variações de resistência à compressão de cada compósito estudado na etapa 1, sendo apresentadas por meio da análise estatística.

Figura 45 – Resistência à compressão potencial axial das misturas em diferentes idades



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

De posse dos resultados, detectou-se que a resistência à compressão da matriz, quando reforçada com microfibra PVA e POL, mantém-se semelhante, apresentando quedas na faixa de 2 a 4 MPa. Todavia, para o concreto reforçado com microfibras de PP, houve redução da resistência de até 36% em comparação ao referência. Em relação aos resultados obtidos nos concretos com microfibras de PP, Monte et al. (2014) verificaram que a presença desses reforços na matriz resulta na redução da resistência à compressão do compósito. Isso também

foi verificado por Tiguman (2004), a qual indicou que, quando inseridas, as fibras de PP atuam como defeito interno no concreto, reduzindo a sua resistência.

Em função das diferentes condições de cura, notou-se que, para os concretos com microfibras, os valores de resistência mantiveram-se próximos. Já no concreto referência a diferença chegou a 4 MPa, pois a C1 teve controle de temperatura e umidade conforme ABNT NBR 5738:2015 e a C2 manteve a mesma temperatura referida na norma, mas a umidade relativa foi de 50%. Com isso, as amostras expostas a C2 estavam propícias a perder água ao meio, uma vez que a umidade tende a equilibrar-se, conforme referenciam Mehta e Monteiro (2014).

Nos concretos com microfibras, a paridade nos valores de resistência pode vir a ser relacionada com o fato de as fibras poliméricas, além de proporcionarem melhoras no controle de fissuração, podem reter a água no interior da mistura. Figueiredo et al. (2002) complementam que o concreto com fibras, dependendo do teor e tipo de fibra, pode apresentar redução total ou parcial da exsudação na matriz, sendo que a exsudação é o fator mais relevante na perda de umidade para o meio. Assim, mesmo com a diferença de umidade entre a cura C1 e C2, os compósitos com fibras não apresentam mudança considerável nas resistências.

Já a Figura 45 evidencia a variação dos valores de resistência à compressão de cada compósito estudo, tanto aos 7 dias, quanto aos 28 dias. Nota-se que a média de resistência à compressão do concreto referência é inferior ao C-PVA e semelhante ao C-POL. Porém, o compósito C-PP atingiu os menores valores, refletindo na média da resistência. Foi possível constatar uma variação menor dos valores nos compósitos com fibras, os quais obtiveram desvio padrão próximo a 1,0 MPa, já o do compósito referência foi superior a 2 MPa. Com isso, aos 7 dias, as resistências da matriz, quando reforçada com fibras, não é prejudicada, com exceção da amostra C-PP.

Aos 28 dias de idade, o desvio padrão da matriz referência ainda foi superior aos compósitos com fibras, porém as médias aproximaram-se de 32 MPa em ambas as condições de cura. No C-PP, assim como os resultados aos 7 dias, a resistência à compressão continuou inferior as demais misturas, média de 23,0 MPa, todavia, com as menores variações entre os resultados da etapa 1. Com base na Figura 45, torna-se evidente de que o uso de fibras nessa matriz cimentícia proporcionou equalização dos valores, obtendo um desvio padrão inferior ao do concreto referência. Além desses, os valores, estatisticamente, não foram minorados, visto pelos diagramas de “caixa e bigode”, mantendo-se na mesma faixa de resistência, com exceção da matriz C-PP.

Em relação ao módulo de elasticidade, como era de se esperar, a inclusão de fibras na matriz diminuiu sensivelmente os valores, todavia, estatisticamente essas variações são inferiores as próprias variações de ensaio. Também, as amostras curadas sob condições C2 foram, em sua maioria, inferiores aos curados conforme ABNT NBR 5738:2015. Podem ser elencados casos pontuais em que as misturas na condição de cura C2 superaram a C1, sendo esses encontrados no C-PP. A Tabela 15 apresenta todos os resultados referentes ao módulo de elasticidade das misturas analisadas.

Tabela 15 – Módulo de elasticidade dos concretos analisados na etapa 1

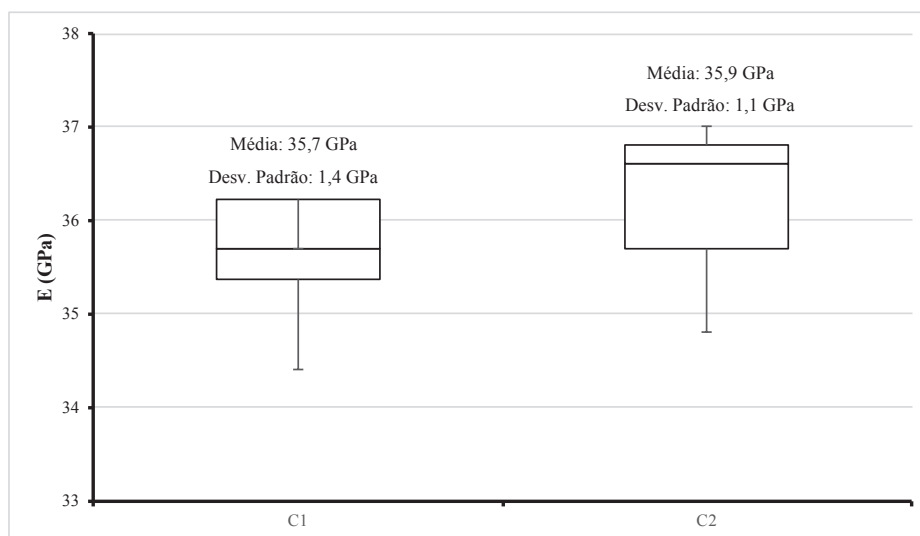
Compósito	Cura	Exemplares	Módulo de elasticidade (GPa)
			28 dias
Referência	C1	1	37,8
		2	36,3
	C2	1	37,0
		2	36,7
C-PP	C1	1	35,7
		2	34,9
	C2	1	36,6
		2	35,8
C-PVA	C1	1	35,7
		2	34,3
	C2	1	34,8
		2	34,4
C-POL	C1	1	34,4
		2	33,6
	C2	1	35,2
		2	34,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C1) cura conforme ABNT NBR 5738:2015; (C2) cura conforme ensaio de anel; (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

A Figura 46 ilustra os resultados obtidos do módulo de elasticidade dos compósitos estudados nessa etapa. Os valores foram obtidos aos 28 dias de idade.

Figura 46 – Análise estatística do módulo de elasticidade dos compósitos nas condições de cura C1 e C2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C1) cura conforme ABNT NBR 5738:2015; (C2) cura conforme ensaio de anel; (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Após a coleta dos resultados, foi possível detectar uma redução do módulo de elasticidade de 1,3 GPa nas matrizes reforçadas com microfibras em comparação com o concreto referência. Essa diferença já era esperada, visto que a inclusão de fibras é capaz de reduzir o módulo de elasticidade da matriz cimentícia e também pela própria variação do ensaio. Por sua vez, os concretos com microfibras de PP e PVA obtiveram valores muito próximos para a condição de cura C1 e o compósito com POL obteve os menores resultados nessa condição.

Apresentando comportamentos muito semelhantes a essa pesquisa, Soroushian (1998) verificou que, em concretos com teores de adição entre 0,10 % e 0,50 % de fibras, o módulo de elasticidade do sistema não é afetado bruscamente, assim como foi visto na Figura 46. A diminuição dos valores absolutos dessa propriedade mecânica ocorre devido a incorporação de ar na matriz, pelo fato da inserção de fibras e, conseqüentemente, o aumento de vazios na pasta. (BALAGURU; RAMAKRISHNAN, 1988). Todavia, as modificações físicas na composição da matriz podem ter sido sensíveis, pelo fato dos reforços proporcionarem ganhos na homogeneização na distribuição de tensões e evitar a nucleação de microfissuras.

Na Figura 46, a diferença entre as condições de cura em que as amostras foram submetidas, notou-se a similaridade entre os valores, tendo as médias próximas a 36 GPa e o desvio padrão de 1,4 e 1,1 para a C1 e C2, respectivamente. Com isso, estatisticamente, os compósitos não possuem diferenças significativas, mesmo que o teor de adição de fibras seja

de 0,50%. Também, para essas propriedades, não eram esperadas melhorias proporcionadas pelos reforços, visto que atuam após a formação de fissuras, atingindo o estágio plástico da matéria, sendo que para esse ensaio, o compósito mantém-se no estado elástico, ou seja, sem a presença de fissuras. Dessa forma, os resultados para os compósitos com e sem fibras e submetido a C1 e C2 mantiveram-se na mesma faixa escalar, conforme diagrama da Figura 46.

4.1.3 Resistência à tração na flexão e fator de tenacidade

Neste item são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade das misturas com reforço de fibras simples e sem reforço. A idade do ensaio foi definida no momento da identificação visual da primeira fissura no concreto quando submetido aos testes de retração restringida pelo método do anel. A Tabela 16 apresenta as informações e os resultados de resistência à tração das matrizes dosadas na etapa 1.

Tabela 16 – Resistência à tração na flexão do concreto referência e com fibras

Compósito	Primeira fissura (dias)	ft (MPa)
Referência	13	3,1
C-PP	14	2,3
C-PVA	14	3,1
C-POL	9	2,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Verifica-se que a inclusão de microfibras na matriz diminuiu sua capacidade de resistir aos esforços de tração gerados no ensaio de tração na flexão dos elementos. A matriz referência apresentou o valor mais elevado, atingindo 3,1 MPa de resistência, tendo o ensaio executado aos 13 dias de idade. Mesmo com um dia a mais de ensaio, as matrizes com microfibras de PP e PVA obtiveram resultados inferiores à referência. Todavia, o decréscimo no ft do compósito com microfibras de PVA foi baixo, sendo muito semelhante ao concreto convencional. Já a adição dos reforços em POL teve o ensaio realizado aos 9 dias de idade, com resultado 18% menor ao concreto referência. Tal variação de valores pode vir a ser relacionado com a idade das análises, o que expõe o material a outros condicionantes. Portanto, já eram esperadas reduções da resistência à tração da matriz quando aplicassem as fibras poliméricas. Segundo Balaguru e Ramakrishnan (1988), uma das explicações para a diminuição dessa propriedade independe do tipo e fator de forma das fibras, já que pode ocorrer o aumento de ar

incorporado na mistura quando as mesmas são associadas a uma matriz cimentícia. Ainda, Maciel et al. (2015) verificam que as misturas com fibras requerem práticas de adensamento dinâmicas, pelo fato da mistura possuir elevado torque de escoamento.

Devido a necessidade de aumentar a energia para adensar os compósitos, foi possível contatar algumas falhas macroestruturais. Tais defeitos ocorreram pela dificuldade no processo de adensamento da matriz, principalmente nas misturas reforçadas com microfibras recicladas de POL. A Figura 47 apresenta as falhas verificadas no centro da amostra anelar de concreto reforçado com fibras de POL.

Figura 47 – Vazios de concretagem devido a dificuldade de adensamento do compósito com fibras de POL



Fonte: Elaborado pelo autor.

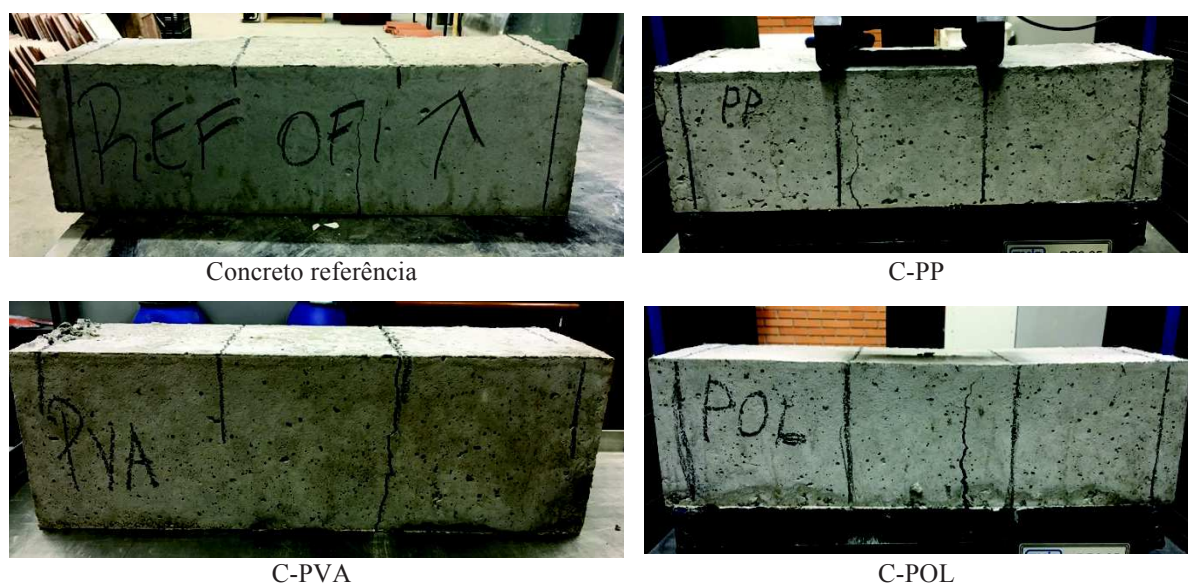
O comportamento mecânico dos concretos com adição de fibras poliméricas também foi estudado por Barr et al. (1988), os quais comprovaram que a inserção desses materiais possui baixa influência na resistência à tração do compósito e, em determinados casos, pode até reduzi-la. Richardson (2016) também constatou a queda da resistência à tração de concretos reforçados com microfibras poliméricas quando comparadas a matriz principal.

Nessa pesquisa, correlacionando o comportamento de cada reforço, constatou-se que as microfibras de PVA promoveram os melhores resultados entre os compósitos, atingindo 3,08 MPa de resistência à tração. A diferença entre os resultados é atribuída às propriedades mecânicas, o formato e a interação de cada fibra para com a matriz, as quais são mencionadas por Figueiredo (2011). Visto que os reforços analisados na pesquisa não possuem mecanismos de ancoragem mecânicos, são poliméricos e flexíveis, os resultados de resistência à tração já eram esperados.

Tendo como base a Tabela 16, a superioridade dos resultados do concreto com microfibras de PVA pode ser associada ao seu módulo de elasticidade (39 GPa), maior entre os reforços, e a sua interação com a matriz. Segundo Li et al. (2004) e Noushini et al. (2013), as microfibras constituídas por PVA destacam-se pelas propriedades mecânicas e pela possibilidade de interagir quimicamente com o concreto. Logo, a transmissão dos esforços ao reforço é feita de maneira mais eficiente e uniforme, o que acarreta em uma melhor contribuição do reforço à matriz. Já as microfibras de PP e POL são desprovidas desse atributo e possuem apenas a interação física, favorecendo o acontecimento do arrancamento do reforço e, por sua vez, diminuindo a sua colaboração à estrutura.

A Figura 48 expressa a forma de ruptura de cada matriz estudada na etapa inicial, tendo como predominante o aparecimento de uma única fissura.

Figura 48 – Ruptura dos concretos após a submissão ao ensaio de tração na flexão



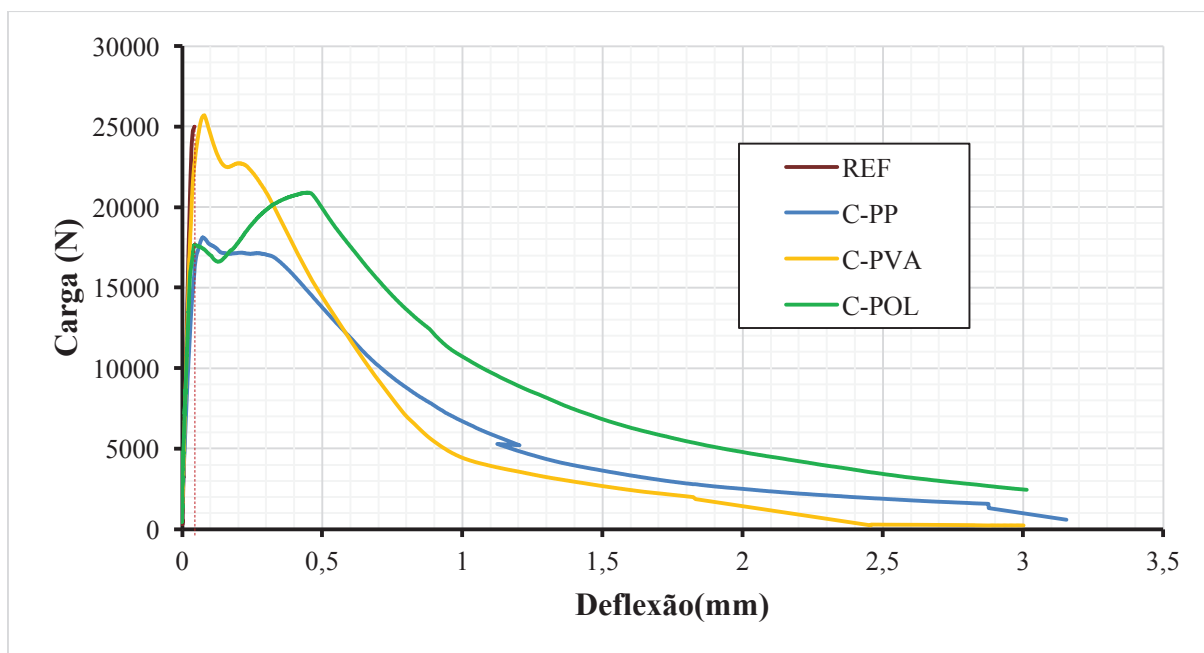
Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Com as imagens apresentadas na Figura 48, evidencia-se que, em todos os casos, a fissura foi constatada no terço médio do prisma, local onde ocorre o momento máximo devido o diagrama de esforços e, conseqüentemente, região de maior concentração de tensões.

Apesar da resistência à tração sofrer impacto negativo com a inclusão dos reforços, a tenacidade dos compósitos com fibras foi muito superior ao referencial. A Figura 49 ilustra as curvas de carga vs deflexão das amostras analisadas.

Figura 49 – Curvas carga vs deflexão obtidas após o ensaio de tenacidade dos compósitos simples



Fonte: Elaborado pelo autor.

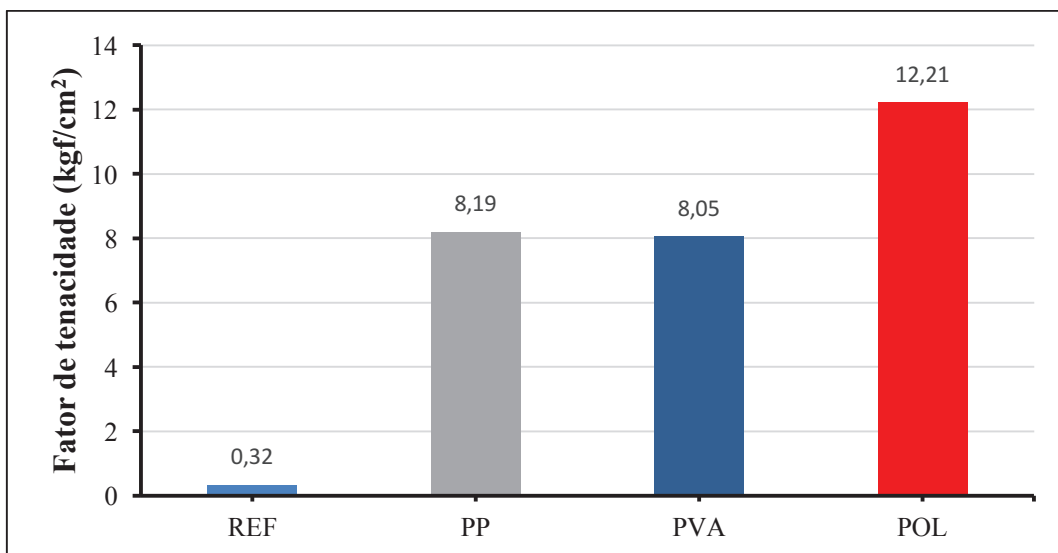
Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Com base nos comportamentos identificados nas curvas ilustradas pela Figura 49, percebe-se que os compósitos reforçados com microfibras possuem a taxa de elevação de carga semelhante ao concreto referência, visto que a matriz reforçada é idêntica para cada compósito. A diferença entre cada mistura pode ser associada ao rearranjo das tensões e reações internas do material promovidas pelas mudanças de morfologia e composição. Também é perceptível a forma de ruptura das matrizes. As amostras de referência possuíam ruptura frágil, onde após atingir o pico de tensão, não exporam efeitos de reação e romperam instantaneamente. Esse comportamento já foi contestado por outros estudos da área, como é o caso de Neville (1997). Já os concretos com fibras apresentaram resistência pós pico, suavizando a queda de carga do compósito. Com isso, definiu-se que o material apresenta pseudo-ductibilidade, assemelhando-se às classificações de Bentur e Mindess (2007).

Observa-se que, mesmo que a matriz seja a mesma, a inclusão de cada tipo de fibra altera consideravelmente o comportamento dos compósitos. Nesses com inclusão das fibras mais curtas foram constatadas inclinações mais acentuadas nas curvas de carregamento. Já o concreto com fibras em POL a curva pós-pico foi mais suavizada, o que promoveu, conseqüentemente, um maior fator de tenacidade. Nessa situação, o comprimento do reforço é fundamental na contenção da nucleação das microfissuras.

A Figura 50 apresenta os valores encontrados para a tenacidade de cada material ensaiado na primeira etapa da pesquisa.

Figura 50 – Fator de tenacidade dos concretos avaliados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Com base nos valores apresentados pela Figura 50, nota-se que a adição de fibras na matriz cimentícia proporcionou aumento no fator de tenacidade em até 11,9 kgf/cm². Barr et al. (1981) identificaram que adição de fibras poliméricas em concretos aumenta o fator de tenacidade à ruptura do material, assim como se verifica nesse estudo. Soroushian (1998), utilizando microfibras de polipropileno em volumes de 0,30 e 0,40%, também constatou fatores de tenacidade próximos de 8 a 10 kgf/cm², conforme verifica-se nessa pesquisa.

Identifica-se que nos concretos com adição de reforços em POL o valor do fator de tenacidade foi o mais elevado, atingindo 12,21 kgf/cm². Tal ação pode estar relacionada ao seu formato geométrico, por serem reforços mais longos, obtendo compatibilidade dimensional entre o reforço e o agregado, como recomenda Figueiredo (2011). Já para os compósitos com PVA e PP, o fator de tenacidade permaneceu próximo a 8,0 kgf/cm², porém inferior ao concreto com microfibras recicladas de POL. Tanto as microfibras de PVA, quanto as de PP eram curtas (6 mm), o que pode explicar a menor compatibilidade dimensional com o agregado graúdo e, por sua vez, o comportamento investigado.

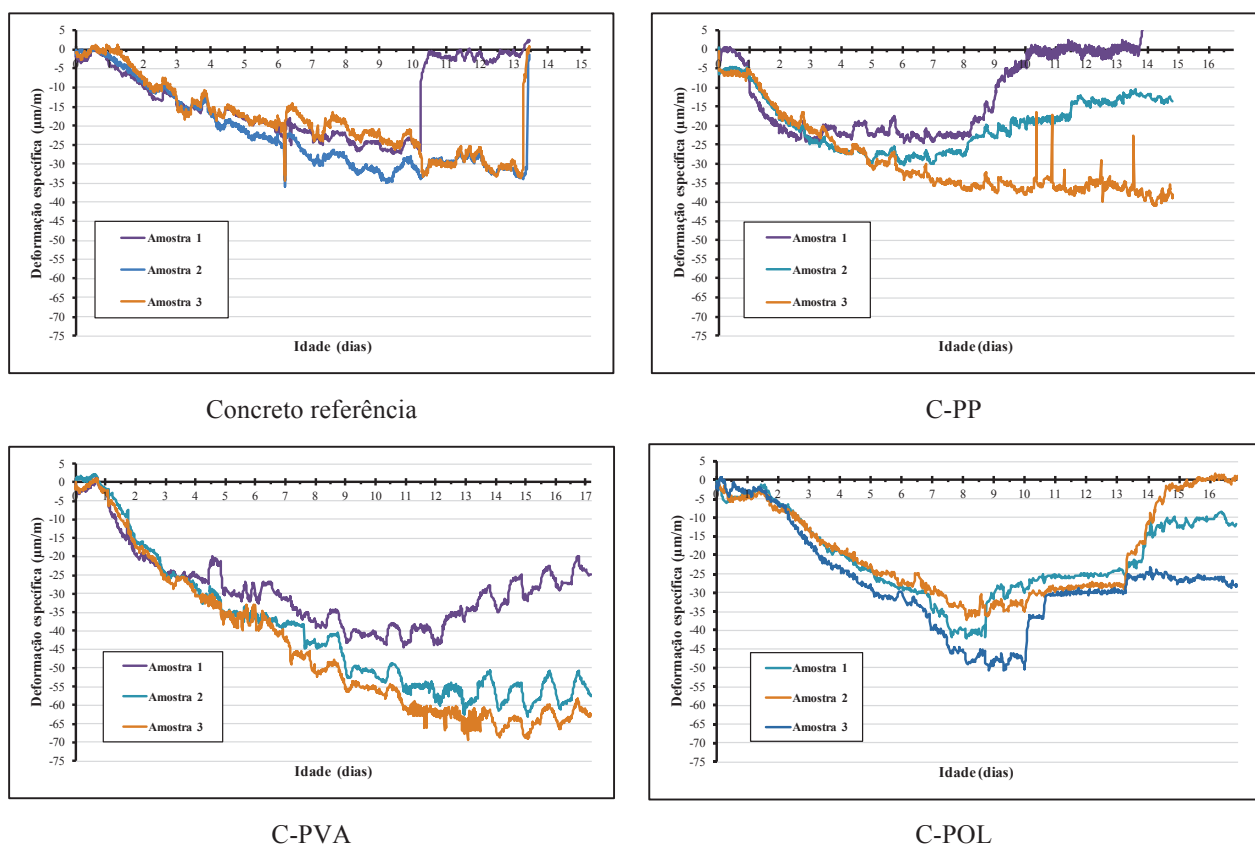
De maneira geral, Barr et al. (1988) e Sofi (2013) afirmam que microfibras poliméricas não são considerados reforços tão efetivos na melhoria da resistência à tração do concreto, porém, os ganhos no fator de tenacidade podem ser expressivos, atingindo valores 20

vezes maiores à matriz referência. Assim, nessa pesquisa foi possível perceber os ganhos na propriedade, tendo o fator de tenacidade acrescido em 38 vezes para o reforço em POL e 26 vezes para as microfibras em PP e PVA.

4.1.4 Retração por secagem restringida

Esse item retrata os resultados relacionados com a retração por secagem restringida pelo método de anel feito nos compósitos em análise na primeira etapa. A Figura 51 ilustra o comportamento e resultados dos concretos em função da retração por secagem restringida. As curvas apresentadas são referentes à retração de cada compósito por meio da deformação média identificada em cada amostra com auxílio de 2 extensômetros elétricos.

Figura 51 – Gráficos da intensidade da retração por secagem em cada mistura (etapa 1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Com base nos gráficos apresentados na Figura 51, é possível verificar que o comportamento das matrizes estudadas foi muito semelhante. Salienta-se que essas amostras foram moldadas a partir da mesma matriz e curadas sob mesmas condições. Todavia, algumas diferenças são identificadas na medida em que se analisam os compósitos de maneira isolada.

Como fator comum entre os concretos, nota-se que, nas primeiras 24 horas após a moldagem das amostras, a sua reação foi dada de forma expansiva, tendo deformação positiva no núcleo metálico. Essa ocorrência pode ser atribuída à dilatação térmica do núcleo promovido pelo calor gerado na hidratação do cimento nesse período inicial. Segundo Mehta e Monteiro (1994) e Rojas e Cincotto (2013), para concretos com cimento do tipo CP V, os acréscimos de temperatura iniciais promovidos pela hidratação do cimento podem alcançar 80 cal/g e durar até 26 horas após o fim da mistura.

Passadas as 24 horas iniciais, as deformações tornaram-se negativas, caracterizando a retração da matriz. No ensaio de retração restringida pelo método de anel é perceptível os alívios de tensão. Mokarem, Weyes e Lam (2005) comentam que os alívios de deformação nos anéis em concreto são referentes a nucleação de fissuras. Isso ocorre pelo fato dos esforços dissiparem-se pela abertura e, conseqüentemente, promoverem o relaxamento das tensões internas das amostras, que antes estavam confinadas.

Nota-se na Figura 51 que a fissuração na amostra 1 do concreto referência ocorreu aos 10 dias de ensaio. Porém, verificou-se, nessa amostra, uma descontinuidade na seção transversal, a qual estava com 30 mm, 8 mm a menos que o estipulado pela norma. Assim, criou-se um ponto frágil, que proporcionou a fissuração precoce. Já as amostras 2 e 3 apresentaram resultados mais realistas, sendo que nos dois corpos de prova ocorreu a presença de fissuração aos 13 dias.

No concreto referência, verifica-se que a inclinação das curvas de deformação das amostras é similar até o 6º dia, após esse período a retração das amostras difere-se entre si. Esse comportamento já era esperado, visto que quaisquer variações morfológicas ou físicas do compósito podem ocasionar leves mudanças de comportamento. Referente a essa afirmação, o presente estudo identificou pequena variação no teor de agregado graúdo nas seções das amostras e na própria geometria do anel de concreto, na ordem de 0,1 a 0,3 mm. Para Gao et al. (2013), algumas alterações físicas, como a formação de microfissuras, também modificam o comportamento do sistema quando submetidos a estes ensaios.

Em relação aos concretos reforçados com microfibras, o comportamento das curvas de deformação foram similares, todavia, a retração do concreto referência foi menor e, após fissuração, apresentou alívio brusco. A matriz referência apresentou desvios de deformação e, em determinados pontos, diferentes em cada amostra. Já nos compósitos com microfibras, as ações foram mais uniformes, visto que essa é uma característica inerente às matrizes com fibras, os quais garantem homogeneidade na distribuições dos esforços internos.

É possível perceber que as deformações por retração nos compósitos com fibras apresentaram-se maiores, ultrapassando os valores encontrados na matriz sem reforço. A inserção de microfibras provocou o aumento da retração por secagem de maneira expressiva, tendo, em alguns casos, quase duplicado as contrações. Porém, as microfibras auxiliaram no aumento da capacidade da matriz de suportar as deformações, os esforços e também suavizando sua forma de ruptura.

Mesmo identificando que a inserção de microfibras proporcionou a modificação nas propriedades físicas do concreto, a capacidade do sistema resistir às cargas também foi alterada, conforme mostra a Figura 50. Com o uso de microfibras poliméricas aumentou-se em média, 25 vezes os valores do fator de tenacidade da matriz, tendo comprovação no ensaio de retração, o qual evidenciou que essas matrizes foram mais resistentes, pois atingiram maiores deformações, que culminaram em maiores esforços internos. Ainda, as dimensões das fissuras foram reduzidas quando comparadas às do concreto referência.

As deformações médias máximas para os concretos são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultados da retração por secagem dos concretos (etapa 1)

Compósito	Exemplares	Idade de fissuração (dias)	Deformação média máxima (µm/m)	Deformação média (µm/m)	ft no método do anel restringido (MPa)	Espessura da fissura (mm)		
Referência	Amostra 1	10	31,94	34,05	6,9	0,4		
	Amostra 2	13	35,82			0,2		
	Amostra 3	13	34,17			0,2		
C-PP	Amostra 1	14	24,83	32,10	6,6	< 0,05		
	Amostra 2	14	30,39					
	Amostra 3	14	41,06					
C-PVA	Amostra 1	15	44,58	59,10	12,1		< 0,05	
	Amostra 2	14	63,21					
	Amostra 3	15	69,46					
C-POL	Amostra 1	9	42,25	43,50	8,9			< 0,05
	Amostra 2	9	37,36					
	Amostra 3	9	50,86					

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Com base na Tabela 17, constata-se que a magnitude das deformações médias máximas do concreto referência permaneceu no intervalo de 32 a 36 $\mu\text{m/m}$, tendo a nucleação de fissuras aos 10 dias. Nos concretos reforçados com microfibras POL ocorreu a fragilização

das amostras aos 9 dias de ensaio, atingindo deformações numa faixa de 40 a 50 $\mu\text{m/m}$. Nos compósitos com PP e PVA, constatou-se a presença de fissuras entre o 14° e 15° dia de ensaio. Porém, as amostras C-PVA atingiram deformações médias máximas próximas de 70 $\mu\text{m/m}$, já as de C-PP, 40 $\mu\text{m/m}$. Dessa maneira, comprova-se que as microfibras de PVA proporcionaram melhorias na capacidade do compósito resistir aos esforços gerados no ensaio de retração restringida, mesmo apresentando fissuras aos 15 dias.

Nas amostras com microfibras de PP e POL, por meio gráfico, é possível identificar o ponto de convecção da curva, com a ocorrência do alívio de tensão. Logo, conclui-se que a fissura foi formada naquele instante. Nos exemplares com microfibras de PVA não houve precisão no ponto em que ocorreu a fragilização do compósito, o qual, na média, ainda permaneceu com elevadas deformações até o encerramento do experimento. Esse comportamento, segundo Figueiredo (2011), demonstra a funcionalidade dos reforços adicionados, os quais mantêm a integridade do sistema sem que haja a propagação da fissura e, consequentemente, garante a capacidade de resistir aos esforços ao longo do tempo.

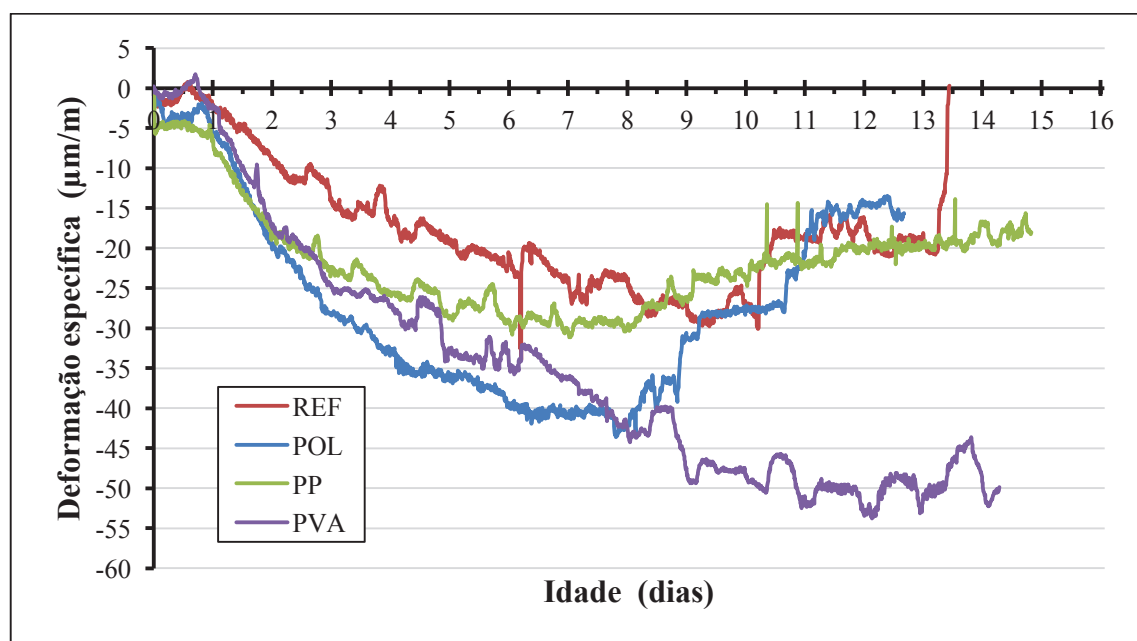
Outro fator diferencial que pode ser relacionado entre as matrizes foi a dimensão das fissuras formadas. No concreto referência, foram nucleadas com dimensões de 0,2 a 0,4 mm. Já em todos os compósitos com fibras a espessura máxima atingida foi menor que 0,05 mm, ou seja, cerca de 8 vezes menor em função da matriz sem reforço. Assim, esses resultados podem impactar na durabilidade dos sistemas com o uso desse tipo de material. Essa diferença está atrelada a forma de ruptura de cada concreto. O compósito com fibras evitou a propagação de fissuras, pelo fato de absorver com mais eficiência os esforços internos de tração gerados no interior do material, conforme visto por Quinino (2015). No concreto convencional a energia gerada na ruptura do elemento foi dissipada e não absorvida por nenhum elemento de reforço, o que provocou a propagação de fissuras e aumentou suas dimensões.

Utilizando como referência os resultados de deformações específicas identificadas no ensaio de retração restringida pelo método do anel, a retração média máxima atingida pela matriz referência foi equivalente a 34,05 $\mu\text{m/m}$. Tal deformação foi consequência da geração de tensões de tração internas de, aproximadamente, 6 MPa na amostra. Com isso, nas condições em que a amostra estava condicionada e restringida, a mesma suportou tensões elevadas e superiores ao próprio resultado de resistência à tração por flexão. Tal diferença está restrita aos procedimentos de ensaio e as medidas instrumentativas. Todavia, nos compósitos com fibras de POL e PVA, as quais obtiveram deformações superiores à referência, as tensões de tração geradas foram de até 12,1 MPa. Ou seja, quase dobrando a resistência encontrada na matriz

referência e nucleando fissuras 8 vezes menores. Nesse caso, as fibras auxiliaram positivamente a matriz, aumentando consideravelmente sua capacidade de resistência e diminuindo bruscamente a seção das fissuras, o que pode garantir um sistema com maior durabilidade e capacidade portante.

A Figura 52 apresenta as curvas de deformação média para cada compósito estudado na etapa inicial da pesquisa.

Figura 52 – Curvas da retração por secagem média das amostras analisadas na etapa 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

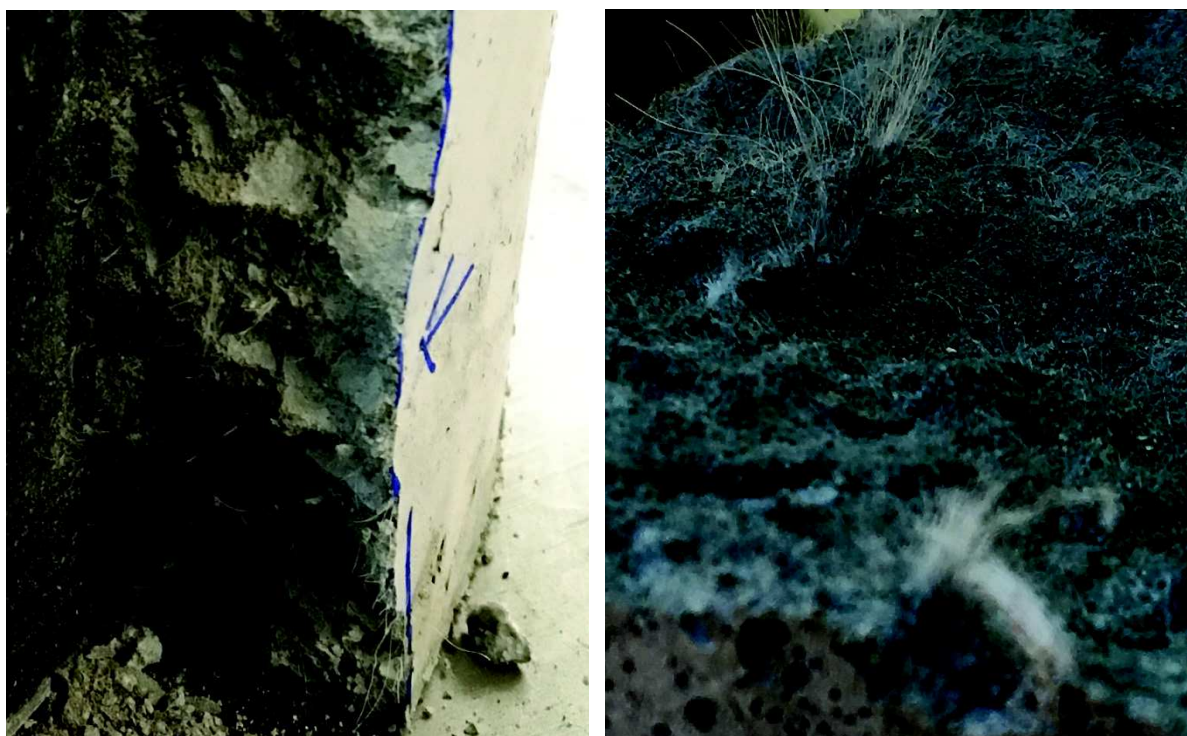
Tomando como base as curvas de deformação por retração dos compósitos apresentados na Figura 52, é notória a diferença de intensidade entre a matriz não reforçada para com as reforçadas com microfibras. As deformações identificadas até às 72 horas mostraram um comportamento equivalente entre os concretos com reforços em fibras. Já no 4º dia, a intensidade da retração foi diferente em cada concreto, sendo o compósito com microfibras recicladas de POL o que atingiu maiores patamares de retração, chegando a 33 $\mu\text{m/m}$. Quando comparado ao referência na mesma idade, o valor foi de, aproximadamente, a metade, retraindo cerca de 16 $\mu\text{m/m}$.

Tanto no concreto referência, quanto nos reforçados com microfibras de PP e POL, as curvas após o 9º dia são semelhantes. Assim, identifica-se o alívio de tensão ocorrido em cada amostra, no qual, com o aparecimento da fissura, tende a diminuir os esforços internos e

diminuir a deformação. O 9º dia tornou-se um marco determinante na mudança de reações entre cada compósito. Ao contrário dessas misturas, o concreto com microfibras de PVA manteve sua deformação constante até o final dos ensaios e não apresentou alívio explícito, mesmo tendo fissuração aos 15 dias de ensaio. Esse comportamento pode estar interligado aos ensaios de caracterização mecânica, sendo que o compósito reforçado com microfibras de PVA apresentou resultados superiores aos demais concretos reforçados com fibras.

As matrizes com inserção de microfibras em PVA e PP apresentaram a formação da fissura com um descarregamento suave, tendenciando o relaxamento das tensões até deformação nula. Já na mistura contendo microfibras recicladas de POL, foi evidente a formação da fissura com auxílio do gráfico das deformações médias, onde aos 9 dias aconteceu a mudança de comportamento do material por meio de um alívio brusco, passando de 39 para 29 $\mu\text{m/m}$, em 11 horas. Essa diferenciação entre o material e o restante dos compósitos com fibras interliga-se com a dificuldade de distribuição dos reforços de POL na matriz, os quais, em alguns casos, formaram pequenos acúmulos de fibras e criaram pontos frágeis no sistema, conforme apresenta a Figura 53. Demonstrando equivalência ao C-POL, o concreto referência, aos 13 dias, apresentou alívio repentino de deformação máxima média, passando de 22 para 2 $\mu\text{m/m}$ em, aproximadamente, 9 horas.

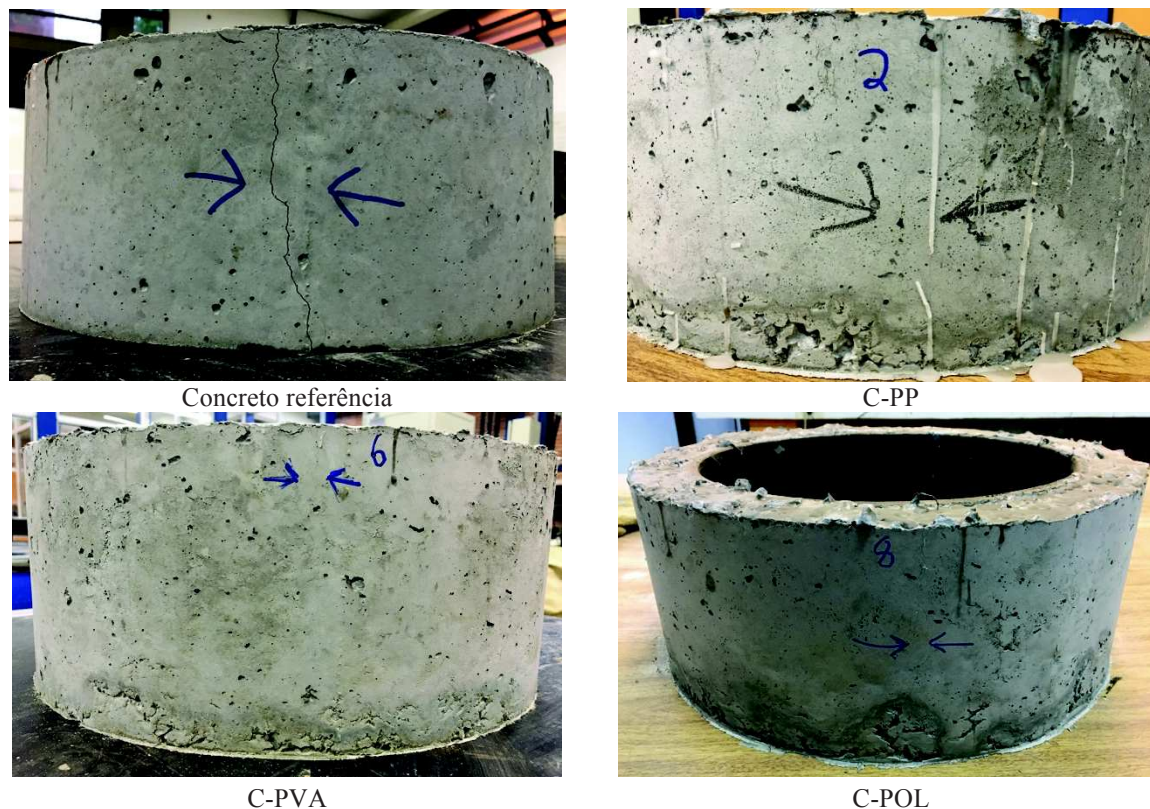
Figura 53 – Acúmulo de microfibras recicladas de POL na seção transversal do anel



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 54 retrata a forma de fissuração dos concretos estudados na primeira etapa.

Figura 54 – Amostras dos concretos após término do ensaio de retração pelo método do anel



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

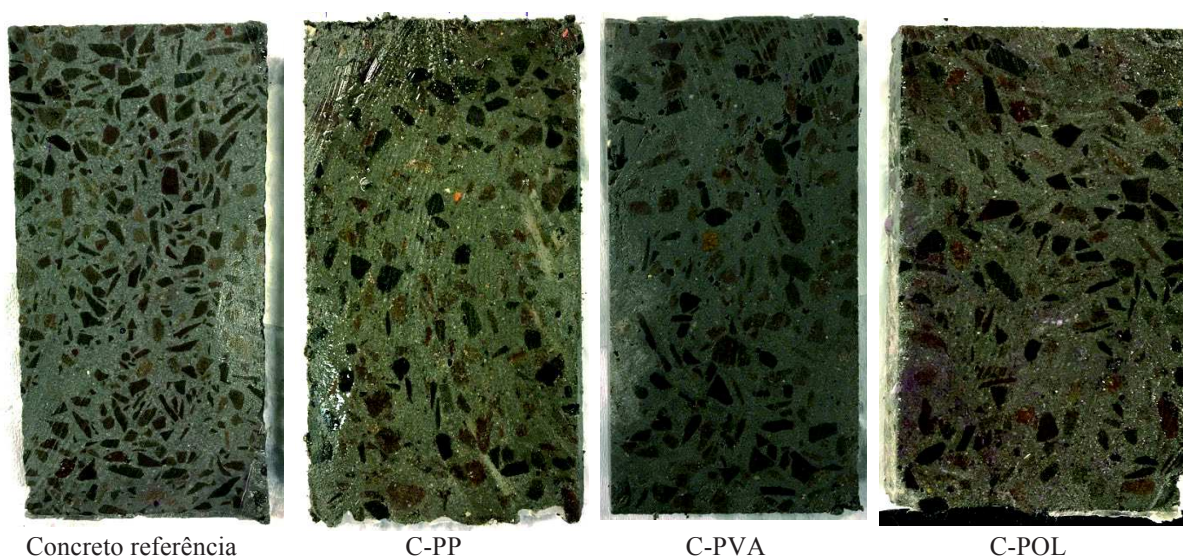
Conforme ilustra a Figura 54, as fissuras nuclearam-se similarmente nas amostras, mesmo sendo diferentes composições. Ambas ocorreram no sentido vertical e propagaram-se da base até o topo. Todavia, a espessura da fissura nos anéis de concreto referência foram visivelmente maiores em relação às demais, chegando a atingir 0,4 mm. As amostras contendo as microfibras obtiveram fissuras com espessuras inferiores a 0,05 mm, conforme Tabela 17. Segundo Figueiredo (2011), além das fibras possibilitarem a mitigação dessas manifestações patológicas, os mesmos dificultam a propagação das fissuras, visto que atuam como pontes de transferência quando inseridas em matrizes cimentícias.

Também deve-se destacar a mudança do acabamento superficial dos anéis. O concreto referência, pela sua boa fluidez, permitiu que não houvesse vazios de concretagem e outras falhas de moldagem. Já nas misturas com microfibras, a mais prejudicada foi a C-PP, contendo pequenos nichos de concretagem e porosidade superficial elevada. As misturas contendo C-PVA, a qual apresentou melhores condições de moldagem e consistência adequada,

atingiram o acabamento mais semelhante ao concreto referência, conforme se observou na Figura 54.

Próximo às seções em que as fissuras apareceram, retirou-se uma amostra com o intuito de verificar a quantidade de agregado graúdo presente na seção coletada. Os corpos de prova foram serrados ao meio, no sentido longitudinal da seção, com o auxílio de uma serra de precisão. Essa ação facilitou a visualização da distribuição interna dos materiais no compósito. A Figura 55 apresenta o concreto referência e os reforçados com microfibras.

Figura 55 – Seção tangencial dos concretos



Concreto referência

C-PP

C-PVA

C-POL

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

As amostras ilustradas na Figura 55 foram retiradas das matrizes estudadas nessa etapa inicial, identificando a distribuição dos agregados graúdos em cada mistura. Assim como foi comentado por Ceccato (1998), a presença de fibras em concretos restringe a movimentação do agregado graúdo, dificultando a distribuição homogênea desses insumos na matriz. Assim, verifica-se que a presença dos agregados graúdos nos compósitos com presença de fibra foi distinta, principalmente na seção do concreto reforçado com microfibras de PVA. A Tabela 18 apresenta os quantitativos dos materiais na seção dos exemplares coletados.

Tabela 18 – Teor de agregado graúdo nas misturas estudadas na etapa 1

Compósito	Teor médio de agregados graúdos (%)
REF	30,41
C-PP	20,95
C-PVA	26,11
C-POL	20,27

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster.

Conforme Tabela 18, o concreto referência apresentou maior teor de agregado contido nas seções analisadas quando comparado ao restante das misturas com microfibras. Ao contrário das amostras referência, os compósitos com microfibras simples sofreram com a redução do teor de agregado graúdo, o que pode explicar o aumento da retração por secagem dessas misturas nos ensaios do anel restringido. Segundo Mehta e Monteiro (2014), quanto maior o teor ou dimensão dos agregados, maior será a restrição na movimentação da pasta e, por sua vez, menor a retração por secagem. Dessa forma, os resultados encontraram-se coerentes com as investigações da literatura.

A diminuição do teor de agregado graúdo nos concretos reforçados com microfibras poliméricas está associada as mudanças de morfologia do compósito. Ao inserir esses reforços em fibras, há a criação de uma malha interna formada pelos próprios reforços, a qual interfere na movimentação do agregado no interior da mistura. Essa ação prejudicou os processos de moldagem e o adensamento do compósito nas fôrmas, tendo as microfibras como elementos que dificultam a homogeneização dos agregados graúdos com o restante dos materiais. Com a formação dessa malha espacial, ocorreu o fenômeno de peneiramento dos agregados, onde as partículas de menores dimensões (pasta cimentícia e agregados miúdos) foram facilmente dispersas, mas as de maiores dimensões (agregados graúdos) foram retidas próximas à superfície da amostra, consideradas como material excedente, e, por sua vez, descartadas. Além das restrições de movimentação, as microfibras tenderam a ocupar uma parcela do volume de agregados presente na própria mistura, também alterando as reações do sistema.

4.2 Etapa II

Os resultados apresentados nesse item são referidos aos compósitos hibridizados. Com base nos resultados obtidos na etapa inicial da pesquisa, determinou-se os teores de hibridização de cada microfibra na matriz cimentícia referência. As quantidades de cada reforço

na composição dos concretos com hibridização das microfibras foram realizadas por meio de cálculo, identificando os resultados que cada fibra obteve ao longo da etapa 1. As características analisadas para identificação do teor de cada microfibra referiram-se às propriedades da matriz no estado endurecido, as quais foram resistência à compressão, resistência à tração e deformação na retração por secagem.

Os concretos com o uso da microfibra de PP obtiveram os piores resultados nas resistências à compressão e tração. Seus valores foram, em média, 30% menores quando comparados as demais misturas. Logo, devido a essas quedas de desempenho, a microfibra de PP foi adicionada em menor quantidade, quando associada à microfibra de PVA e POL. Todavia, o C-PP foi o compósito com fibras que obteve as menores deformações por retração, que também permaneceram 30% menores quando comparados ao C-PVA e C-POL. Diante das afirmações, os teores de hibridização para as matrizes C-PP+PVA e C-PP+POL foram de 30% para as de PP e 70% para PVA ou POL.

Os concretos com as microfibras de PVA e POL atingiram os melhores resultados na etapa 1, logo foram adicionados em maior quantidade, quando associadas ao PP. Frente a hibridização entre o PVA e POL, devido a paridade entre as propriedades mecânicas de compressão e tração do compósito, e suas propriedades físicas de retração por secagem, determinou-se os teores de adição equivalentes, ou seja, 50% de PVA e 50% POL.

A Tabela 19 ilustra os teores de adição utilizados na etapa 2 do estudo.

Tabela 19 – Teores de hibridização das microfibras em cada compósito

Compósito	Microfibra PP (%)	Microfibra PVA (%)	Microfibra POL (%)	Teor total de adição (%)
C-PP+PVA	30	70	0	0,50
C-PP+POL	30	0	70	
C-PVA+POL	0	50	50	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Conforme apresenta a Tabela 19, os teores de hibridização foram obtidos conforme o comportamento dos compósitos frente aos ensaios de caracterização, sendo determinante na escolha dos volumes de mistura. Assim, estipulou-se os valores de hibridização a fim de melhorar as propriedades mecânicas da matriz, diminuir a influência da fibra na deformação por retração e alterar o modo de ruptura das matrizes após a fissuração.

4.2.1 Propriedades no estado fresco (consistência)

A Tabela 20 apresenta os resultados dos ensaios de abatimento por tronco de cone e VeBe do concreto referência e das misturas híbridas com e sem adição de aditivo superplastificante.

Tabela 20 – Propriedades das matrizes no estado fresco

Compósito	Sem aditivo superplastificante		Com aditivo superplastificante		
	Abatimento (mm)	VeBe (s)	Teor de aditivo (%)	Abatimento (mm)	VeBe (s)
Referência	235	0,85	0	-	-
C-PP+PVA	25	9,55	0,88	50	7,34
C-PP+POL	75	10,35	0	-	-
C-PVA+POL	45	5,34	0,50	85	2,71

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Assim como foi identificado na primeira etapa da pesquisa, a inserção de fibra na matriz referência afetou suas propriedades no estado fresco e, conseqüentemente, refletiu na sua trabalhabilidade. Na Tabela 20, constata-se que a mistura com inserção de microfibras de PVA e POL atingiram os melhores valores, quando comparada aos demais compósitos hibridizados. Os resultados dessa mistura foram satisfatórios no ensaio de abatimento e VeBe, tanto no período pré, quanto pós adição do superplastificantes, mesmo aplicando o menor teor de aditivo (0,50%) da pesquisa. Também foi possível constatar que a presença do aditivo superplastificante na mistura C-PVA+POL garantiu melhores resultados, reduzindo próximo da metade o seu tempo de VeBe, o qual atingiu 2,71 segundos, e aumentando em 30 mm seu abatimento, passando de 55 para 85 mm.

Já a consistência das amostras C-PP+PVA foi consideravelmente alterada, visto que os reforços inseridos possuíam comprimentos de apenas 6 mm, os quais provocaram o refinamento da malha de fibras no interior da matriz, diminuindo a movimentação da pasta. Com isso, foi necessário adicionar uma maior quantidade de aditivo superplastificante equivalente a 0,88%, sendo a maior da pesquisa. Mesmo com quantidade elevada de aditivo químico, os ganhos foram mínimos, cerca de 25 mm no abatimento e 23% do tempo de adensamento (VeBe).

Na mistura C-PP+POL não foi necessária a adição de aditivo superplastificante, visto que já atingia a classificação especificada, ou seja, S50. Portanto, não há resultados no período pós inserção de aditivo superplastificante. Analisando apenas os resultados no ensaio de VeBe, o C-PP+POL obteve o maior tempo de adensamento, possivelmente pelo acúmulo de PP com POL, formando grumos, os quais dificultaram o adensamento da mistura. Dessa maneira, nota-se a discrepância entre os ensaios de abatimento e VeBe para caracterização da matriz no estado fresco, mesmo que aplicados na mesma matriz.

Verificou-se que a diferença dimensional entre as fibras proporcionou impactos distintos na consistência da matriz. A fibra de maior dimensão, a de POL, associada às menores, PP e PVA, apresentou impactos mais sensíveis, sem que houvesse prejuízos expressivos na trabalhabilidade da matriz. Isso foi visto nos concretos C-PVA+POL e C-PP+POL, os quais obtiveram abatimentos iniciais superiores a 50 mm. Já com a hibridização das microfibras de PP e PVA, suas propriedades foram mais afetadas no estado fresco, pois a formação da malha de microfibras tornou-se mais fechada, quando compara ao C-PP+POL e C-PVA+POL. Assim, a movimentação dos agregados é mais afetada e, por sua vez, causou mudanças na trabalhabilidade dos compósitos com esse tipo de reforço. Além desse fator, a área superficial de molhagem aumentou expressivamente e também influenciou na consistência da matriz.

As classes de trabalhabilidade foram referidas por meio do ensaio de VeBe, conforme apresenta a Tabela 21.

Tabela 21 – Classificação das misturas pré e pós adição do superplastificante

Compósito	Classificação abatimento		Classificação VeBe	
	Sem aditivo	Com aditivo	Sem aditivo	Com aditivo
Referência	S220	-	Fluido	-
C-PP+PVA	S10	S50	Rígido	Rígido
C-PP+POL	S50	-	Muito rígido	-
C-PVA+POL	S10	S50	Rígido	Fluido

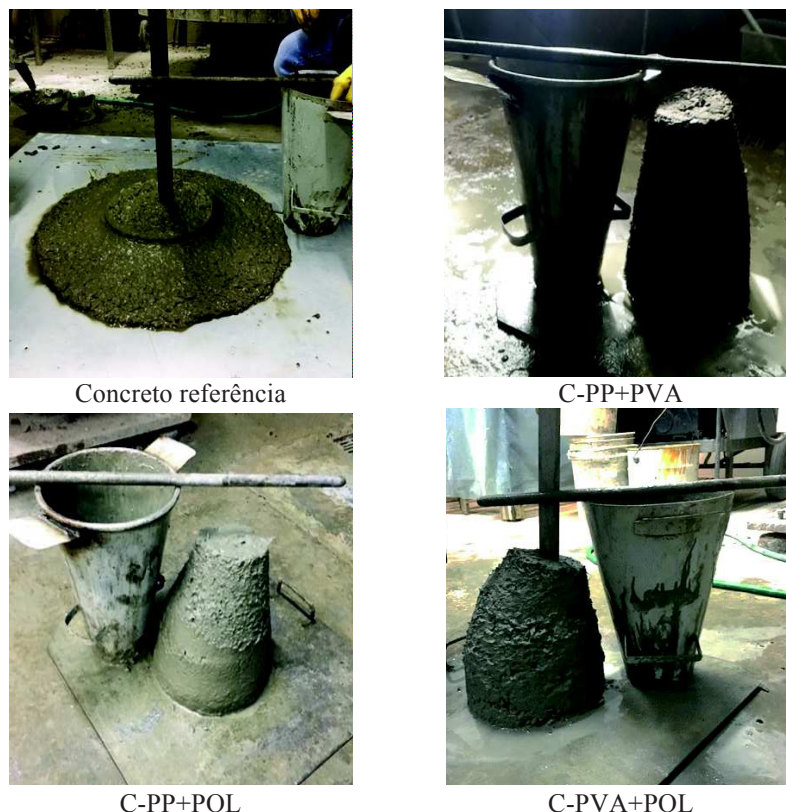
Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

A inserção de aditivo superplastificante nas misturas proporcionou mudanças mínimas na classificação das mesmas. Todavia, no concreto C-PVA+POL o uso do aditivo possibilitou reajustar a classificação do compósito de rígido para fluido. No compósito C-PP+POL não foi utilizado aditivo químico em virtude de a mistura atingir a classe de abatimento inicial especificada S50 e evitar possíveis danos à mistura, como, por exemplo, a exsudação.

A Figura 56 ilustra o aspecto do concreto referência e dos compósitos hibridizados após o ensaio de abatimento por tronco de cone.

Figura 56 – Resultados do ensaio de abatimento pelo método do tronco de cone nos concretos analisados



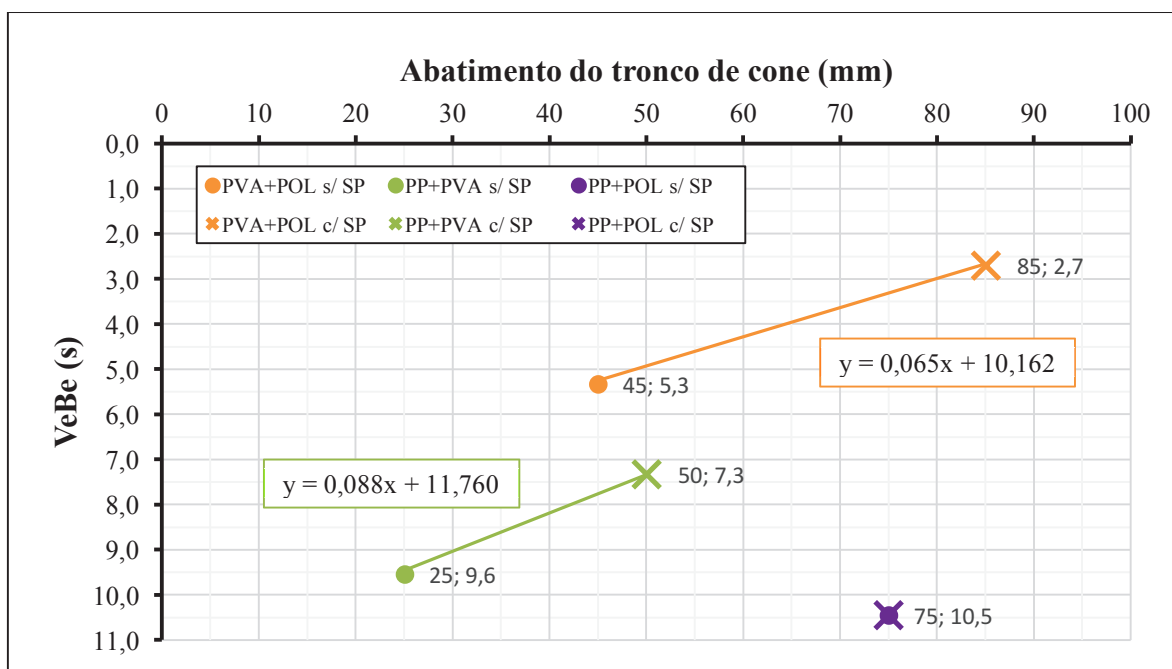
Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Referente ao aspecto visual de cada compósito apresentado na Figura 56, é possível perceber conformidade no acabamento superficial de cada mistura, identificando um teor de argamassa adequado, ausência de exsudação e de segregação. Com isso, a adição híbrida de microfibras, para essa pesquisa, não proporcionou prejuízos ao concreto no estado fresco, com exceção da perda de consistência.

Segundo Figueiredo e Ceccato (2015), as análises de consistência de concretos reforçados com fibras devem ser feitas utilizando os ensaios adequados. Para essas circunstâncias, o ensaio de VeBe é o mais indicado, como foi visto na etapa 1. A fim de identificar a interrelação entre os diferentes ensaios para com as misturas estudadas na segunda etapa, elaborou-se a Figura 57.

Figura 57 – Correlação entre os ensaios realizados no estado fresco (Etapa 2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (s/ SP) sem aditivo superplastificante; (c/ SP) com aditivo superplastificantes; (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Os resultados apresentados na Figura 57 comprovam a evolução nas propriedades do estado fresco das misturas quando se aplicou aditivo superplastificante, sendo um comportamento já esperado. Também foi possível identificar a similaridade dos compósitos C-PVA+POL e C-PP+PVA, os quais obtiveram a mesma influência no período pré e pós aditivo. Pode-se compreender o impacto do aditivo químico em cada mistura através da inclinação das retas.

A variabilidade dimensional dos reforços, quando aplicados de maneira híbrida na mesma matriz, manteve o mesmo comportamento com o uso do aditivo químico. Nesses casos, o C-PVA+POL e C-PP+PVA necessitaram de teores de adição iguais a 0,50% e 0,88% em relação à massa de cimento, respectivamente, para atingirem os valores requeridos. Eram esperados volumes maiores de aditivo na mistura C-PP+PVA, pelo fato de serem mais influentes na restrição dos movimentos dos agregados. Segundo Mangat e Swamy (1974), as microfibras dificultam as melhorias na consistência da mistura, sendo necessário adotar medidas mais severas para alteração na classificação da trabalhabilidade. A mistura C-PP+PVA alcançou um consumo de aditivo 1,6 vezes maior quando comparado ao consumo da mistura C-PVA+POL.

4.2.2 Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Os resultados da resistência à compressão axial do concreto referência e dos concretos reforçados com fibras híbridas foram analisados nas idades de 7 e 28 dias, em duas condições de cura, conforme Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados da resistência à compressão dos concretos analisados na etapa 2

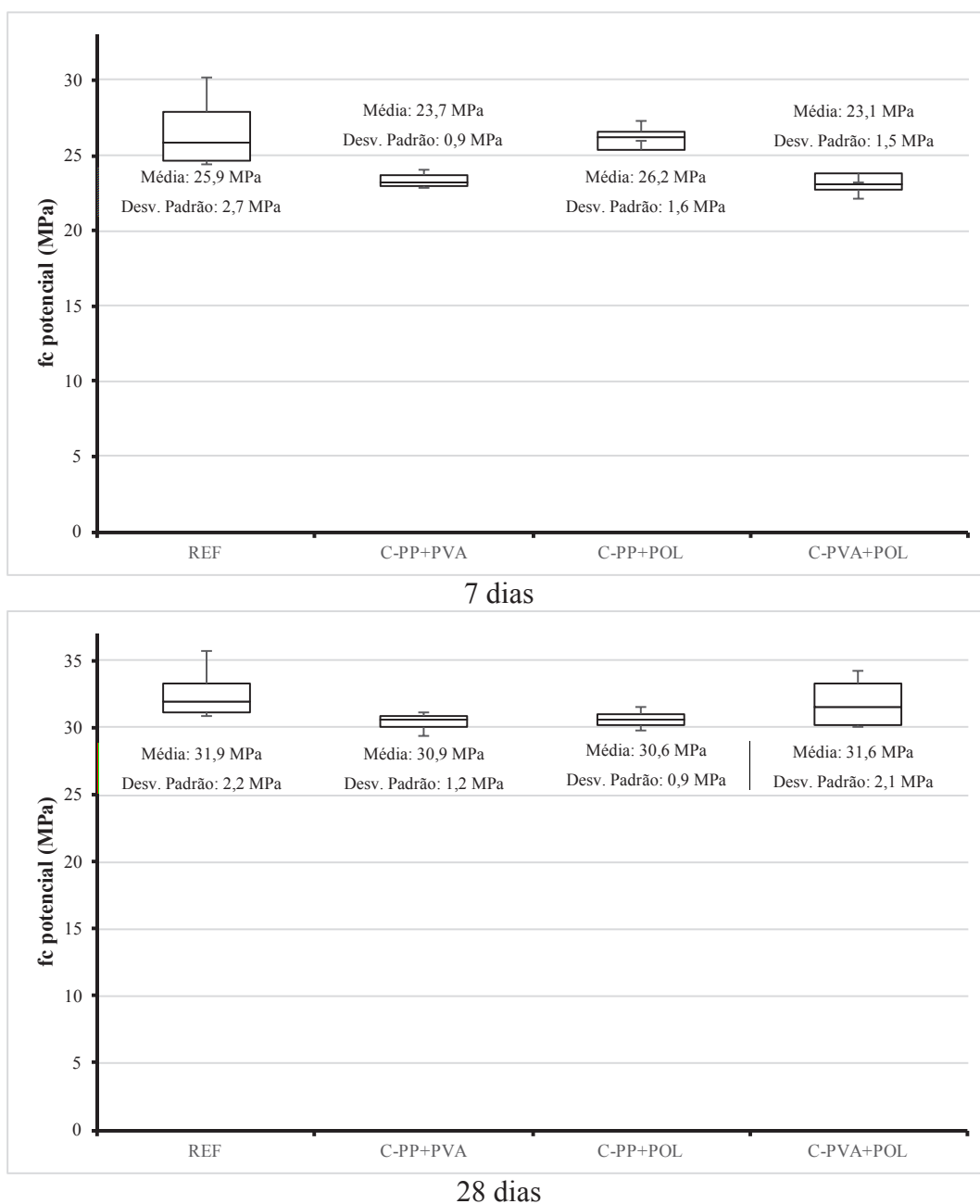
Compósito	Cura	Amostras	Resistência à Compressão (MPa)	
			7 dias	28 dias
Referência	C1	1	30,2	35,7
		2	27,1	32,5
	C2	1	24,7	31,3
		2	24,4	30,9
C-PP+PVA	C1	1	23,2	30,6
		2	22,8	29,4
	C2	1	24,7	32,2
		2	24,1	31,1
C-PP+POL	C1	1	26,0	31,5
		2	23,6	29,7
	C2	1	27,3	30,6
		2	26,3	29,8
C-PVA+POL	C1	1	25,6	34,2
		2	22,9	33,0
	C2	1	23,2	30,2
		2	22,1	30,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C1) cura conforme ABNT NBR 5738:2015; (C2) cura conforme ensaio de anel; (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

A Figura 58 apresenta as variações de resistência à compressão de cada compósito estudado na etapa 2, sendo apresentadas por meio da análise estatística.

Figura 58 – Resistência à compressão axial das misturas na etapa 2 em diferentes idades



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Analisando os resultados contidos na Tabela 22 constata-se que o comportamento das misturas analisadas na segunda etapa foi muito similar aos resultados obtidos na etapa inicial. Em ambas, a inserção de fibras diminuiu a capacidade de carga da matriz quando relacionada com a resistência à compressão axial do concreto referência. Comparando os resultados entre os compósitos com fibras, a mistura C-PVA+POL na cura C1 atingiu valores

mais elevados. Os compósitos contendo a microfibras de PP apontaram as maiores quedas de resistência, assim como visto na etapa 1 e também confirmado por Tiguman (2004).

Referente às resistências à compressão investigadas aos 7 dias, notou-se que a matriz referência apresentou os melhores resultados na condição de cura C1, atingindo 30,2 MPa. Em seguida, a mistura C-PP+POL com 26,0 MPa na mesma condição e idade de ensaio. O restante das misturas apresentou valores entre 23 a 25 MPa. A Figura 58 apresenta as médias de resistência à compressão de cada compósito, tendo todos os valores similares. Ambas as misturas estão presentes na mesma faixa de valores, todavia apresentam variações dessemelhantes. O concreto referência apresentou desvio padrão de 2,7 MPa, tendo os compósitos com fibras híbridas um desvio padrão inferior ao referência.

Aos 28 dias, a matriz referência atingiu a resistência potencial mais elevada, 35,7 MPa, e os demais compósitos híbridos próximos aos 32,0 MPa. Nessa idade, as condições de cura diferiram-se minimamente, tendo o concreto referência a maior variação, diminuindo em 4 MPa a resistência potencial da cura C1 para C2. No restante dos compósitos hibridizados essa queda de resistência entre as condições de cura foi, em média, 1,3 MPa. A proximidade dos valores nos compósitos com hibridização associa-se a atuação das microfibras como controladores de cura, as quais reteram a água no interior da mistura, conforme foi discutido nos resultados da etapa 1.

A Figura 58 contém as médias e desvio padrão dos compósitos estudados na etapa 2, sendo possível constatar similaridade entre as resistências à compressão de todas as misturas aos 28 dias, tendo a média próxima de 31,0 MPa. Os valores permanecem em uma mesma faixa, a qual pode ser percebida pela avaliação estatísticas criada com os diagramas de “caixa e bigode”. Também aos 28 dias, o desvio padrão da matriz referência é superior aos demais. Com isso, assim como foi visto na etapa 1, a inclusão com teor de 0,50% de fibras na matriz não influi significativamente na sua resistência à compressão e é capaz de diminuir as variações do material, tornando o compósito mais isotrópico.

De maneira geral, os ganhos de resistência das matrizes, comparando as idades de ensaio, foram, em média, 6,8 MPa dos 7 até 28 dias, para os concretos reforçados com fibras. O concreto referência apresentou aumento de 5 MPa de resistência à compressão, para o mesmo intervalo de tempo. Os ganhos de resistência também podem ser relacionados ao funcionamento dos reforços no interior da mistura, possibilitando a permanência da umidade no sistema e, consequentemente, melhores condições para a hidratação dos grãos de cimento anidro.

A Tabela 23 apresenta todos os resultados das misturas para os valores de módulo de elasticidade.

Tabela 23 – Módulo de elasticidade dos concretos analisados na etapa 2

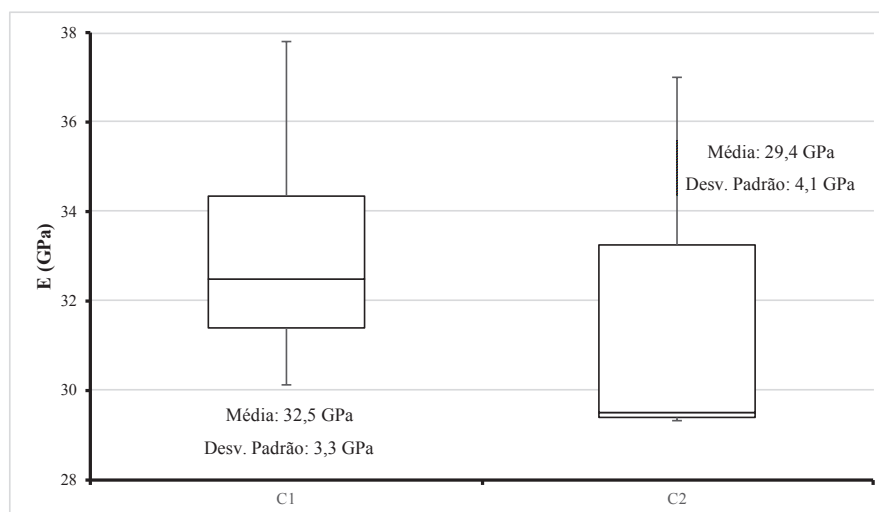
Compósito	Cura	Exemplares	Módulo de elasticidade (GPa)
			28 dias
Referência	C1	1	37,8
		2	36,5
	C2	1	37,0
		2	35,9
C-PP+PVA	C1	1	33,2
		2	32,4
	C2	1	29,3
		2	28,6
C-PP+POL	C1	1	31,8
		2	30,2
	C2	1	29,5
		2	27,9
C-PVA+POL	C1	1	30,1
		2	29,6
	C2	1	28,1
		2	27,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C1) cura conforme ABNT NBR 5738:2015; (C2) cura conforme ensaio de anel; (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

A Figura 59 ilustra os resultados obtidos do módulo de elasticidade dos compósitos estudados na etapa 2. Os valores foram obtidos aos 28 dias de idade.

Figura 59 – Módulo de elasticidade potencial do concreto referência e os reforçados com fibras híbridas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C1) cura conforme ABNT NBR 5738:2015; (C2) cura conforme ensaio de anel; (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Assim como foi identificado na primeira etapa, a inserção de fibras híbridas na mistura promoveu a queda do módulo de elasticidade da mistura. Essa queda foi perceptível tanto na cura C1, quanto na cura C2. Todavia, a diferença do módulo de elasticidade da matriz referência com os compósitos hibridizados foi, em média, 6,0 GPa na C1 e 8,0 GPa na C2. Já na primeira etapa, a queda do módulo na cura C1 e C2 foi de, respectivamente, 2,7 GPa e 2,4 GPa. Com isso, a hibridização das fibras teve maior queda no módulo de elasticidade, quando associado aos compósitos com fibras isoladas. A Figura 59 apresenta a diferença entre o módulo de elasticidade das misturas em diferentes condições de cura, tendo a média da C1 32,5 GPa e 29,4 GPa a média da cura C2. Porém, a variabilidade dos valores em cada condição foi grande, atingindo um desvio padrão maior de 3,0 GPa. Assim, estatisticamente os valores permanecem similares, conforme apresenta o diagrama de “caixa e bigode”.

Os resultados foram menores na segunda etapa, verificando que a hibridização prejudicou a matriz referência e o compósito com microfibras isoladas. Segundo Tiguman et al. (2004) e Bentur e Mindess (2007), esse fenômeno é inerente aos compósitos com fibras, visto que a diferença entre os resultados está associada ao próprio reforço. De acordo com Tiguman et al. (2004), a fibra pode atuar como falha no sistema, uma vez que não possuem resultados satisfatórios à compressão e possibilitam a formação de vazios internos.

4.2.3 Resistência à tração na flexão e tenacidade

Nesse item são apresentados os resultados de resistência à tração na flexão e o fator de tenacidade das misturas com reforços hibridizados e referência. A Tabela 24 apresenta os resultados da resistência à tração das matrizes dosadas na etapa 2.

Tabela 24 – Resistência à tração na flexão dos compósitos com fibras híbridas e o concreto referência

Compósito	Primeira fissura (dias)	ft (MPa)
Referência	13	3,1
C-PP+PVA	15	2,9
C-PP+POL	10	2,9
C-PVA+POL	10	2,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Analisando os resultados expressos na Tabela 24, nota-se que os concretos reforçados com microfibras hibridizadas obtiveram resistência à tração muito semelhante entre si. A proximidade dos valores expressa uma boa correlação entre a variabilidade de hibridização dos diferentes reforços. Porém, as idades de ensaio foram distintas na mistura C-PP+PVA. Visto que o ft do concreto referência foi de 3,13 MPa, os compósitos com fibras apresentaram redução da resistência à tração da matriz, possivelmente, pelo incremento de ar e falhas de concretagem, como apontam Balaguru e Ramakrishnan (1988).

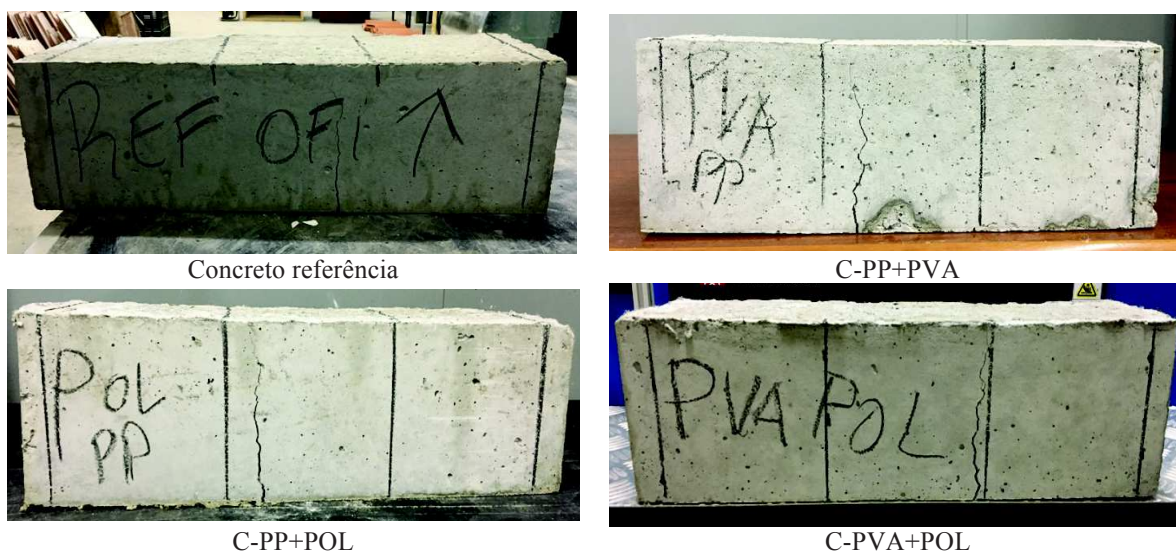
Embora a inserção das fibras promova a redução da resistência à tração na flexão do compósito, na etapa 2 a queda dos valores foi pequena, sendo possível afirmar que, para os compósitos híbridos desse trabalho, os reforços não promoveram efeitos prejudiciais, ao contrário da etapa inicial. Em comparação com a etapa inicial, o concreto reforçado com microfibras de PVA atingiu os melhores valores, ficando próximo do referência. Contudo, a hibridização dessa fibra com os demais resultou na diminuição do ft, pois tanto a fibra de PP, quanto a de POL afetaram a capacidade da matriz em resistir aos esforços de tração. A adição de reforços constituídos em PVA auxiliaram na propriedade de resistência à tração na flexão do compósito.

De maneira geral, a hibridização das microfibras resultou na estabilização da capacidade de carga da matriz referência e também aumento da resistência à tração em

comparação aos compósitos com fibras isoladas. A melhora nessa propriedade mecânica está relacionada ao funcionamento de cada reforço, os quais atuaram em momentos distintos, visto que possuíam propriedades físicas diferentes, como é do caso do módulo de elasticidade e dimensões geométricas.

A Figura 60 expressa a forma de ruptura dos concretos estudados na segunda etapa, tendo como unânime o aparecimento de uma fissura única.

Figura 60 – Ruptura dos concretos após a submissão ao ensaio de tração na flexão



Fonte: Elaborado pelo autor.

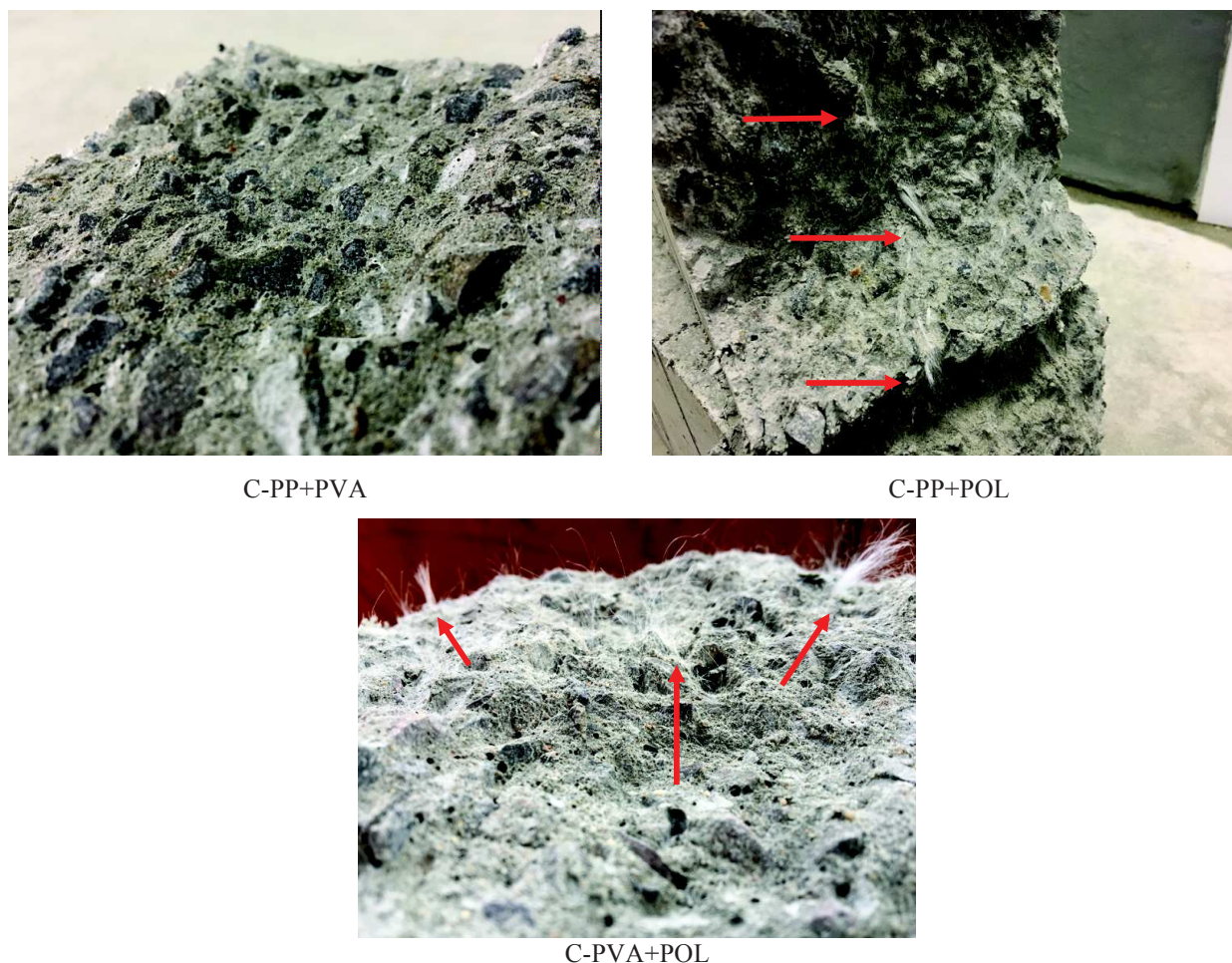
Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

As formas de ruptura identificadas nos concretos com microfibras híbridas ilustradas na Figura 60 foram idênticas às encontradas na etapa inicial do estudo. A formação da fissura permaneceu dentro do terço médio demarcado na amostra, conforme recomenda a norma JSCE-SF4:1984. Nesse caso, a adição de microfibras poliméricas não promoveu o aumento na resistência à tração, estando em concordância com as indagações de Soroushian (1998).

Também se ressalta o acabamento superficial dos corpos de prova no estado endurecido. As superfícies das amostras de concreto com fibras híbridas apresentaram maior número de vazios e falhas de concretagem, sendo o reflexo da dificuldade do adensamento da mistura no estado fresco pela presença das microfibras no teor de adição estudado. Essas falhas podem acontecer tanto externamente, quanto internamente, conforme pesquisa de Balaguru e

Ramakrishnan (1988). A Figura 61 apresenta a seção transversal das amostras em concreto, onde foi possível verificar algumas falhas internas.

Figura 61 – Distribuição e arrancamento das fibras nas matrizes



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Foi possível visualizar algumas falhas na parte interna dos prismas e também elevada presença de poros, conforme Figura 61. A precepção desses vazios ocorreu em todos os compósitos hibridizados. As anomalias ocorridas nas amostras prismáticas em questão assemelham-se às afirmações de Balaguru e Ramakrishnan (1988) e Maciel et al. (2015), com relação à reologia da mistura.

Na amostra C-PVA+POL foi evidente a presença das microfibras de POL, devido seu comprimento e distribuição pela seção. Todavia, foi perceptível o acúmulo pontual desses reforços em determinados locais da seção, o que, conforme Figueiredo (2000), promove a formação de zonas frágeis no compósito. As mesmas constatações nas amostras C-PVA+POL

estiveram presentes na C-PP+POL. Já nos exemplares com a presença dos reforços menores, ou seja, de PVA e PP, a distribuição das fibras foi mais homogênea, conforme ilustra a Figura 62.

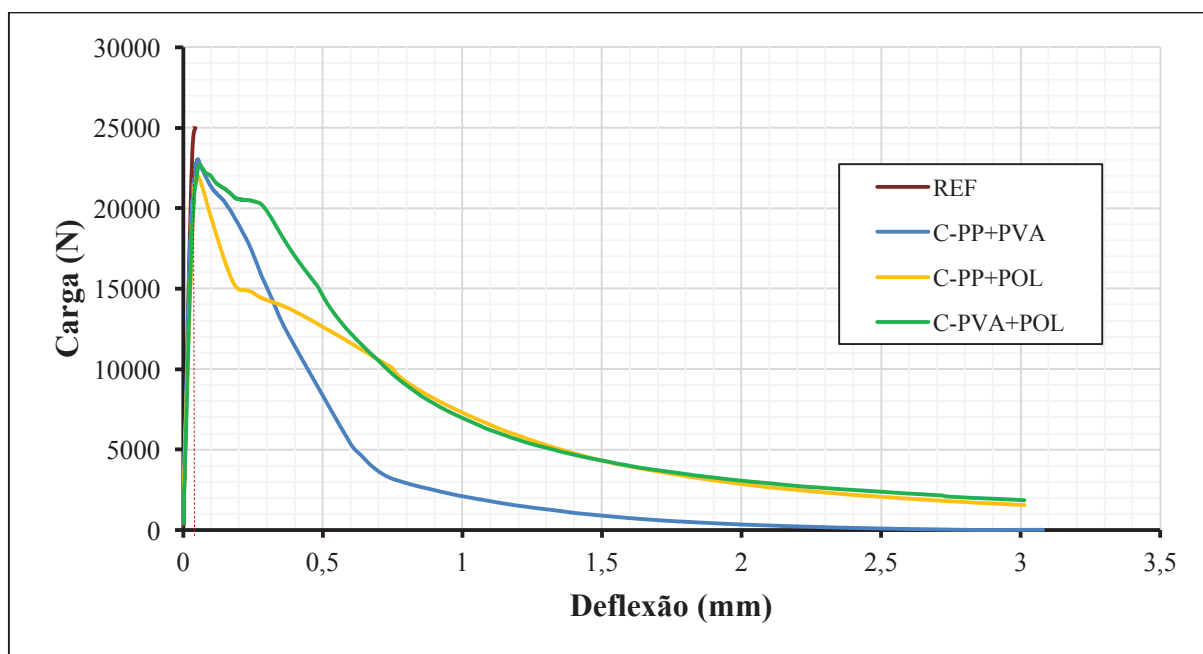
Figura 62 – Distribuição das microfibras de PVA e PP na matriz cimentícia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os procedimentos de ensaio de resistência à tração na flexão e fator de tenacidade geraram as curvas de carga vs deflexão, as quais são apresentadas na Figura 63.

Figura 63 – Curva carga vs deflexão obtidas após o ensaio de tenacidade dos compósitos híbridos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

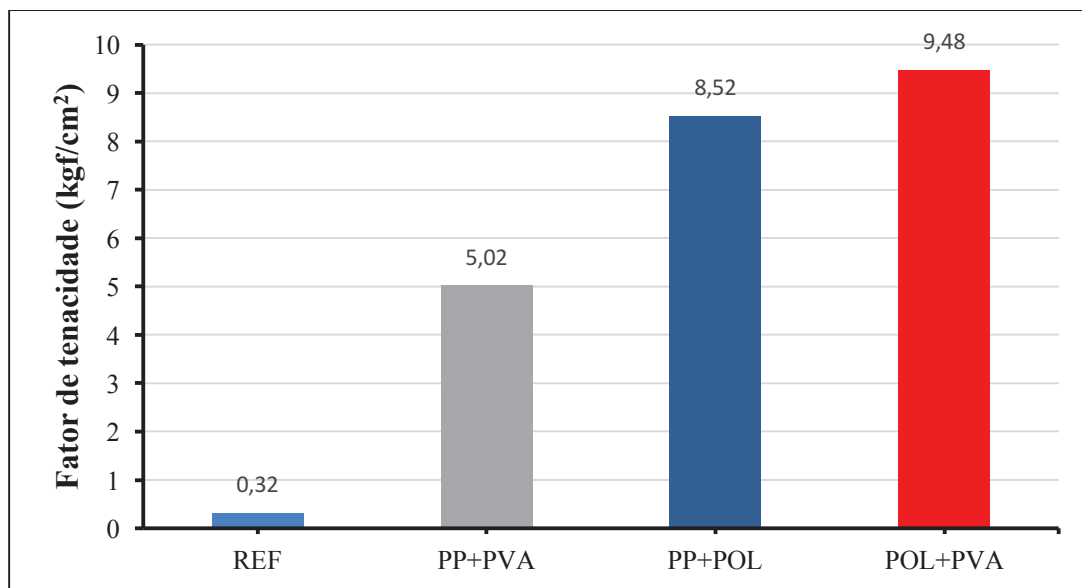
As curvas apresentadas na Figura 63 ilustram o comportamento dos compósitos quando submetidos aos carregamentos no ensaio para determinação do fator de tenacidade e resistência à tração na flexão. Observa-se que a mistura de maior capacidade foi a matriz referência, ultrapassando a carga de 24000 N, e a dos compósitos com fibras foi próxima de 22000 N. Todavia, a inserção dos microfibras na matriz proporcionou mudança no seu comportamento mecânico, principalmente, após o pico de tensão, o que nesse caso foi satisfatório.

A matriz referência obteve queda brusca no carregamento após atingir o pico de tensão. Já no restante dos compósitos, após a fragilização, o sistema ainda adquiriu capacidade de resistir aos esforços solicitantes, visto que os reforços foram acionados, evitando a propagação das fissuras. A formulação das curvas evidencia a alteração na forma de ruptura dos materiais, passando do estado frágil para o pseudo-dúctil. Segundo Bentur e Mindess (2007), esse comportamento é comum em compósitos reforçados com microfibras poliméricas ou metálicas.

Correlacionando os diferentes compósitos com microfibras hibridizadas, nota-se que as amostras C-PVA+POL e C-PP+POL apresentaram similaridade no seu comportamento. Ambas, após a carga máxima, sofreram queda acentuada e logo após reagiram aos carregamentos. Esse resultado pode estar relacionado ao acionamento dos reforços, sendo que as fibras de menores dimensões, ou seja, PP e PVA, não foram solicitadas devido a sua compatibilidade dimensional com a fissura nucleada. Após esse período, o material passou a obter a contenção dos esforços, devido a presença da microfibra de POL, que possuía dimensão muito superior às demais e, por sua vez, abrangeu a área de fissuração, demonstrando melhor desempenho na contenção da abertura.

As amostras em C-PP-PVA, ao contrário das demais, evitaram o alívio brusco das tensões após o carregamento máximo, suportando e evitando a ruptura precoce do material. Porém, após alguns instantes, com a propagação da fissura, passaram a perder a eficiência, levando o material à ruptura brusca. Esse comportamento está associado ao estudo de Lawler et al. (2003), que comprova bons resultados dos compósitos híbridos, quando ocorre a inserção de reforços de diferentes fatores de forma e comprimentos. Assim, nesse trabalho, os compósitos C-PP+PVA obtiveram fibras de dimensões iguais, ou seja, atuando no mesmo estágio. Já as misturas C-PVA+POL e C-PP+POL apresentaram resultados mais favoráveis, atingindo fator de tenacidade mais elevado, como pode ser constatado na Figura 64, pela diferenciação dimensional dos reforços e atuação em dois estágios.

Figura 64 – Fator de tenacidade dos concretos avaliados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

A inserção de fibras na matriz cimentícia estudada proporcionou o aumento do fator de tenacidade nas duas etapas do trabalho. Observa-se que a inserção híbrida de fibras promoveu quedas de desempenho nas misturas analisadas na etapa 2, principalmente no caso do C-PP+PVA, quando comparados aos resultados obtidos nos compósitos com fibras simples. Conforme comprovou-se na etapa 1, o concreto reforçado com as microfibras recicladas de POL atingiu o fator de tenacidade mais elevado da pesquisa, 12,21 kgf/cm², enquanto os demais ficaram próximos aos 8,0 kgf/cm². Em função dos compósitos com microfibras simples, a incorporação híbrida de diferentes microfibras não proporcionou melhoras no fator de tenacidade da matriz.

Foi possível evidenciar a eficiência das fibras de POL tanto nos compósitos da etapa 1, quanto na etapa 2. Tal comportamento já era esperado, pois suas propriedades geométricas são mais favoráveis em relação as demais. Nota-se que nas misturas C-POL, C-PP+POL e C-PVA+POL, o fator de tenacidade supera 8,50 kgf/cm², sendo os maiores da pesquisa. Com isso, a mescla de fibras mais curtas (PP e PVA) com as mais alongadas (POL) trás benefícios às propriedades mecânicas da matriz, principalmente o fator de tenacidade.

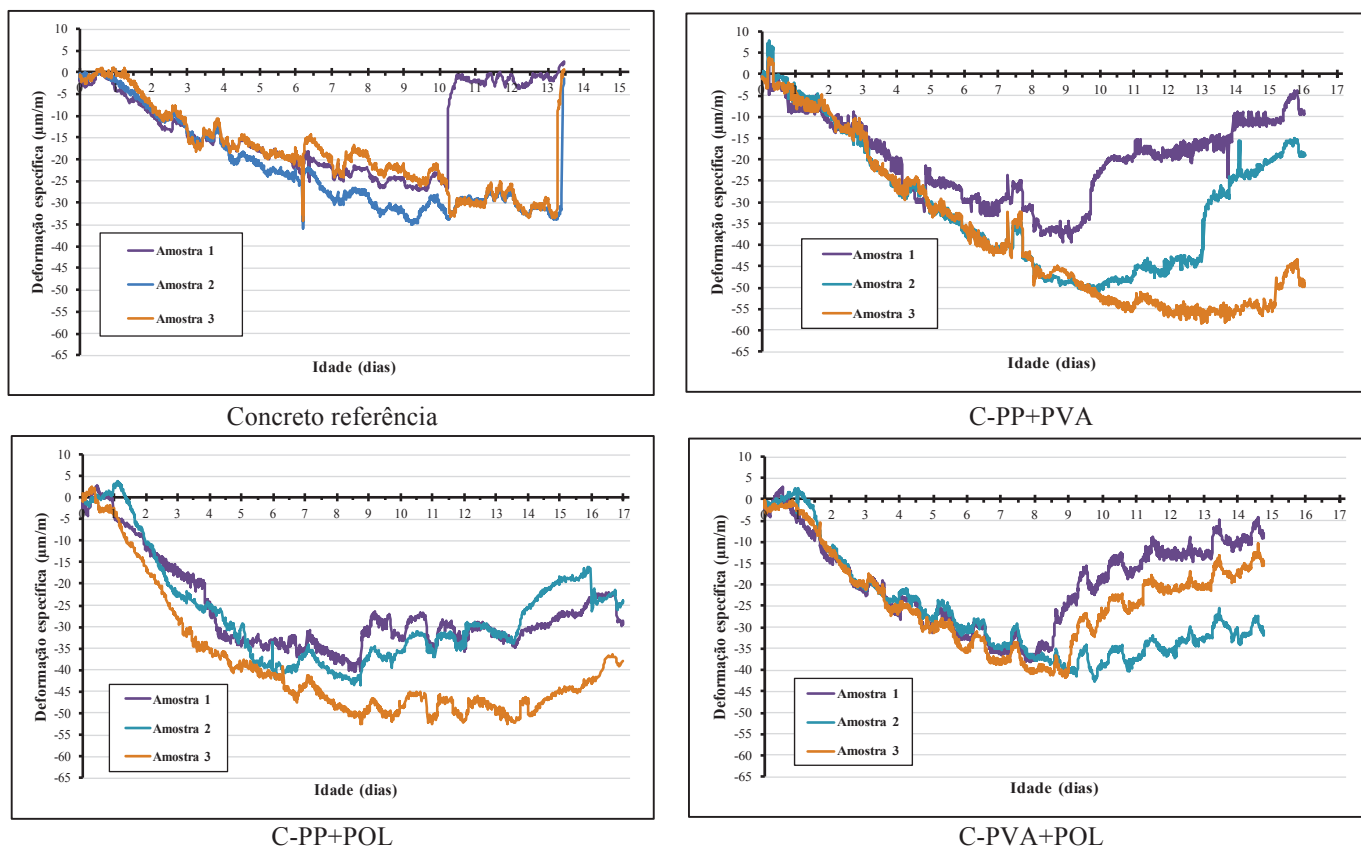
Em um contexto geral, quando comparado o fator de tenacidade do concreto referência com os compósitos com fibras, houve um aumento expressivo, visto que as fibras auxiliaram na evolução da energia de ruptura do material, devido ao combate de propagação da

fissura. Assim, os reforços passaram a absorver os esforços por meio do fenômeno de pontes de transição. Tal evolução atingiu valores 30 vezes mais elevados em relação ao compósito referência. Esses comportamentos e valores também foram vistos nos trabalhos desenvolvidos por Soroushian (1998) e Barr et al. (1988).

4.2.4 Retração por secagem restringida

Esse item retrata os resultados relacionados à retração por secagem restringida dos compósitos analisados na segunda etapa. A Figura 65 ilustra o comportamento dos concretos em função da sua deformação, devido a retração por secagem restringida.

Figura 65 – Intensidade da retração por secagem em cada mistura (etapa 2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Os comportamentos verificados nas misturas apresentadas na Figura 65 mostram-se semelhantes aos encontrados na etapa 1 do trabalho. Nas primeiras 24 horas, os compósitos

cimentícios obtiveram deformações positivas vinculadas ao calor liberado na hidratação do cimento anidro e, conseqüentemente, dilatando o núcleo metálico.

Conforme a etapa 1, o concreto referência apresentou comportamento frágil próximo aos 14 dias, por meio do alívio repentino das tensões e, por sua vez, nucleação das fissuras. Também atingiu deformações máximas entre 28 a 34 $\mu\text{m/m}$. Todavia, as amostras C-PVA+POL obtiveram retração máxima na faixa de 37 a 40 $\mu\text{m/m}$, o que demonstra o aumento da retração com a incorporação mista das fibras. Após a fissuração, as tensões foram suavizadas, onde os reforços utilizados combateram a propagação das fissuras até o fim dos experimentos. Nessas amostras, ocorreu a mudança de comportamento, sendo que, posteriormente ao 8º dia, as deformações diminuíram, ilustrando o alívio das tensões internas e início da formação das fissuras. A constatação visual das fissuras nas amostras C-PVA+POL foi possível no período entre 9º e 10º dia. Com base nos resultados do compósito com microfibras recicladas de POL e PVA observa-se que são semelhantes aos encontrados para as amostras de C-POL na etapa 1. Naquela ocasião, a retração foi levemente superior e com alívios de tensão bruscos. Desse modo, a hibridização dos reforços em PVA e POL permitiu melhorias na forma de ruptura, homogeneidade e diminuição da retração por secagem.

As amostras contendo as fibras de PP e PVA atingiram valores de retração, em média, de 50 a 55 $\mu\text{m/m}$. Analisando a mistura C-PP+PVA, constatou-se que, até os primeiros 5 dias de ensaio, os valores e comportamento das amostras foi idêntico. Porém, após esse período, houve divergência das curvas, o que pode ter sido ocasionado pela incompatibilidade dimensional, alterações nos teores de agregado graúdo de uma seção ou também pela nucleação de microfissuras. Contudo, a identificação visual das fissuras só pode ser aferida aos 15 dias de ensaio. Nas curvas de cada amostra C-PP+PVA é possível verificar o alívio de tensões no período próximo ao 15º dia. Com a nucleação de fissuras, as amostras 1 e 2 já permaneciam sob baixas tensões, devido ao alívio de deformação, sendo possível afirmar que a fissuração da matriz já havia ocorrido alguns dias antes da constatação visual da mesma. Dessa maneira, os reforços contribuíram no controle da propagação da abertura, postergando o aparecimento da mesma e suavizando as tensões geradas pela restrição da retração. A hibridização dos reforços em PP e PVA proporcionou maior variância de valores na retração das matrizes, porém postergou o aparecimento das fissuras até o 15º dia e, diante das afirmações, elevou a resistência do compósito suportando deformações de até 55 $\mu\text{m/m}$.

A retração por secagem restringida dos concretos C-PP+POL mostrou-se semelhante ao longo de todo o período de análise. A inclinação das curvas de deformação

ocorridas nos dias iniciais, mostrou-se mais elevada, quando comparada ao final dos ensaios. Até o 5º dia a matriz atingiu deformação média de 35 $\mu\text{m/m}$, superando a retração inicial dos demais compósitos. Posteriormente, os valores permaneceram entre 40 e 50 $\mu\text{m/m}$. Com base nas curvas de deformação das amostras C-PP+POL apresentadas na Figura 65, nota-se que, aos 9 dias de ensaio, aconteceu o alívio nas deformações das 3 amostras. Por sua vez, constatou-se no 10º dia a formação das fissuras. Nesse caso, as fibras mantiveram constante os esforços internos, visto que a curva das deformações se manteve próxima à deformação máxima ocorrida na ruptura do material. Após a fragilização do compósito, observa-se alívios nas curvas de deformação, comprovando o combate dos reforços com a propagação da abertura. Nesse compósito hibridizado, os reforços combateram com mais eficiência a propagação da fissura, porém a mesma foi constatada precocemente, como foi identificado nas amostras C-POL e C-PVA+POL da etapa 1 da pesquisa.

A Tabela 25 apresenta as dimensões das fissuras encontradas nas amostras estudadas na etapa 2 do estudo.

Tabela 25 – Resultados da retração e fissuras dos concretos com e sem microfibras poliméricas hibridizadas

Compósito	Exemplares	Idade de fissuração (dias)	Deformação média máxima (μm/m)	Deformação média máxima (μm/m)	ft no método do anel restringido (MPa)	Espessura da fissura (mm)		
Referência	Amostra 1	10	31,94	34,05	6,9	0,4		
	Amostra 2	13	35,82			0,2		
	Amostra 3	13	34,17			0,2		
C-PP+PVA	Amostra 1	10	39,48	50,50	10,3	< 0,05		
	Amostra 2	13	52,84					
	Amostra 3	15	59,11					
C-PP+POL	Amostra 1	9	49,97	48,80	10,0		< 0,05	
	Amostra 2	10	43,82					
	Amostra 3	11	52,56					
C-PVA+POL	Amostra 1	9	38,77	41,30	8,5			< 0,05
	Amostra 2	12	43,14					
	Amostra 3	10	41,88					

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Os resultados obtidos na Tabela 25 podem ser relacionados entre si, como é o caso das amostras C-PVA+POL e C-PP+POL. Ambos os compósitos foram constituídos pelo

reforço em POL e apresentaram idades de fissuração semelhantes, próximos aos 10 dias de idade. Correlacionando esses resultados com a mistura C-POL, as fissuras ocorreram no mesmo período. Além da idade de fissuração ser similar, as deformações mantiveram-se entre 40 e 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Analisando as propriedades físicas de retração, a hibridização dos demais reforços com a microfibra reciclada de POL não promoveu melhorias no sistema, embora proporcionou o maior fator de tenacidade entre as misturas. Os resultados nas duas etapas estão associados às dificuldades de moldagem das misturas com as fibras de POL, os quais necessitaram de maior energia de adensamento e ineficiência na distribuição da microfibra na matriz cimentícia.

Todavia, o compósito denominado C-PP+PVA obteve deformações entre 50 e 60 $\mu\text{m}/\text{m}$ e idade média de fissuração nos 13 dias. Os resultados apresentados nessa mistura já eram esperados, visto que na primeira etapa os melhores comportamentos nos ensaios de retração por secagem restringida foram nas misturas C-PP e C-PVA. Na ocasião, a idade de fissura foi aos 14 dias. A intensidade das deformações por retração elevou-se, quando relacionado ao C-PP, e diminuíram, frente ao C-PVA. Assim, a hibridização dos reforços em PP e PVA equalizou as propriedades físicas de retração da matriz. As alterações de comportamento no concreto C-PP+PVA foram sutis, pois os comprimentos dos reforços foram idênticos, o que ocultou a complementação de propriedades de uma fibra a outra. Nesse sentido, os reforços atuaram nos mesmos estágios.

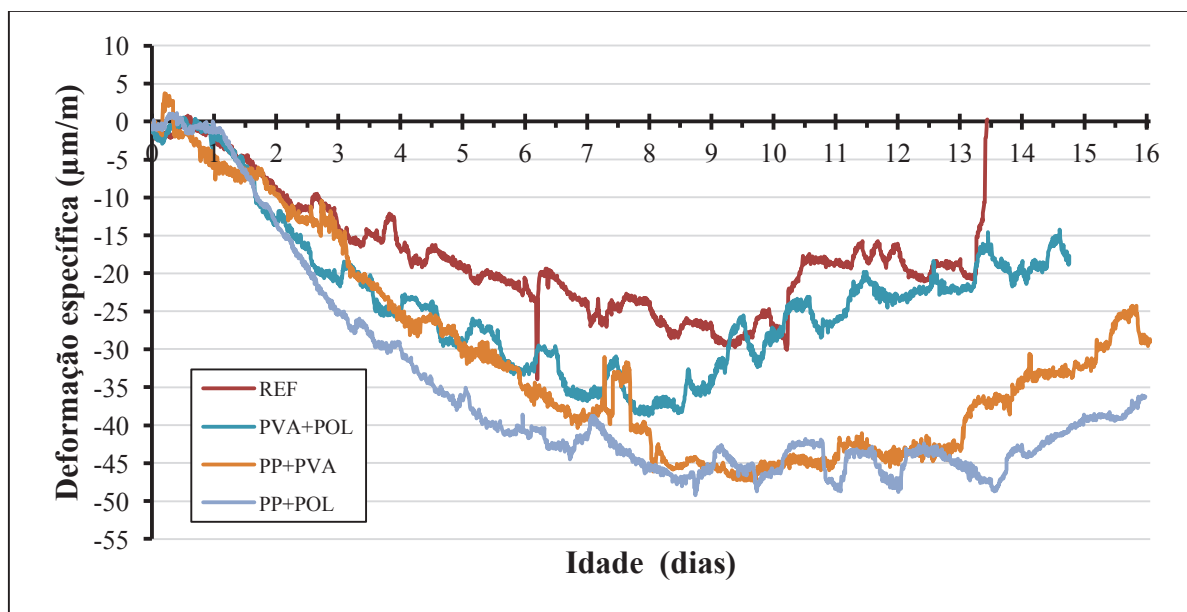
Ressalta-se que a incorporação de fibras, tanto de maneira simples, quanto hibridizada, proporcionou a redução das seções geométricas das fissuras. Os compósitos com fibras obtiveram aberturas inferiores a 0,05 mm, porém o concreto referência atingiu fissuras com aberturas de 0,4 mm e 0,2 mm, até 8 vezes maior que os concreto com fibras poliméricas.

Na segunda etapa, semelhante ao constatado na etapa inicial, os resultados voltados a retração por secagem das matrizes foram elevados, tendo a retração média máxima dos compósitos com fibras superior a 41 $\mu\text{m}/\text{m}$. Em termos de concentração de tensões de tração internas geradas devido a restrição dos movimentos do anel, pode-se verificar que os compósitos com hibridização de fibras PP e POL obtiveram a geração de tensões próximas a 10,0 MPa até o momento da nucleação de fissuras. A hibridização com PP e PVA proporcionou resistência de tração próximas a 10,4 MPa. Verificou-se a diferença entre as resistências obtidas no ensaio de anel e de tração na flexão, pois as particularidades de cada análise são expressas para obter determinados ensaios. Além do aumento das tensões internas e, consequentemente, da resistência à tração, as fibras, assim como a etapa 1, proporcionaram fissuras 8 vezes menores às nucleadas na matriz referência. Torna-se evidente os ganhos dos reforços com fibras

nessas matrizes quando são analisadas frente a retração, capacidade de resistir aos esforços de tração gerados no ensaio e a capacidade de evitar a propagação da abertura das fissuras.

De maneira a discutir os resultados comparativamente, a Figura 66 apresenta as curvas de deformação média para cada compósito estudado na segunda etapa da pesquisa.

Figura 66 – Curvas da retração por secagem média das amostras analisadas na etapa 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Na Figura 66 observa-se que o concreto referência obteve os menores valores e forma de ruptura frágil. Isso pode ser evidenciado aos 13 dias de ensaio, quando se nota um alívio de deformação brusco. Já nos compósitos com hibridização não foram perceptíveis os pontos de nucleação das fissuras. Porém, em todas as misturas, na etapa final de ensaio, evidenciou-se a diminuição das tensões internas pelo alívio nas deformações.

Analisando comparativamente as misturas com microfibras, observa-se que a retração inicial foi muito mais intensa em função da matriz referência. Todas as matrizes que receberam a inclusão de fibras obtiveram retração por secagem superior ao concreto referência. Conforme mencionado na etapa 1, a inclusão de fibras na matriz cimentícia proporcionou vazios de concretagem pela dificuldade de adensamento do material e pode ter aumentado o volume de ar incorporado no sistema. A similaridade nessas propriedades foi visível até o 7º dia, quando a retração de cada compósito fibroso se distinguiu entre si.

A mistura C-PVA+POL atingiu a menor retração dos compósitos híbridos e apresentou, aos 8 dias, a convecção da curva de deformação, aliviando as tensões e nucleando as fissuras. Analisando a consequência da incrementação individual de cada reforço na matriz cimentícia, nota-se que a retração das amostras em C-PVA+POL foi reduzida em comparação ao compósito C-PVA. Todavia, a hibridização em questão não atingiu desempenho satisfatório, mantendo a idade de fissuração idêntica às amostras C-POL testadas na etapa 1.

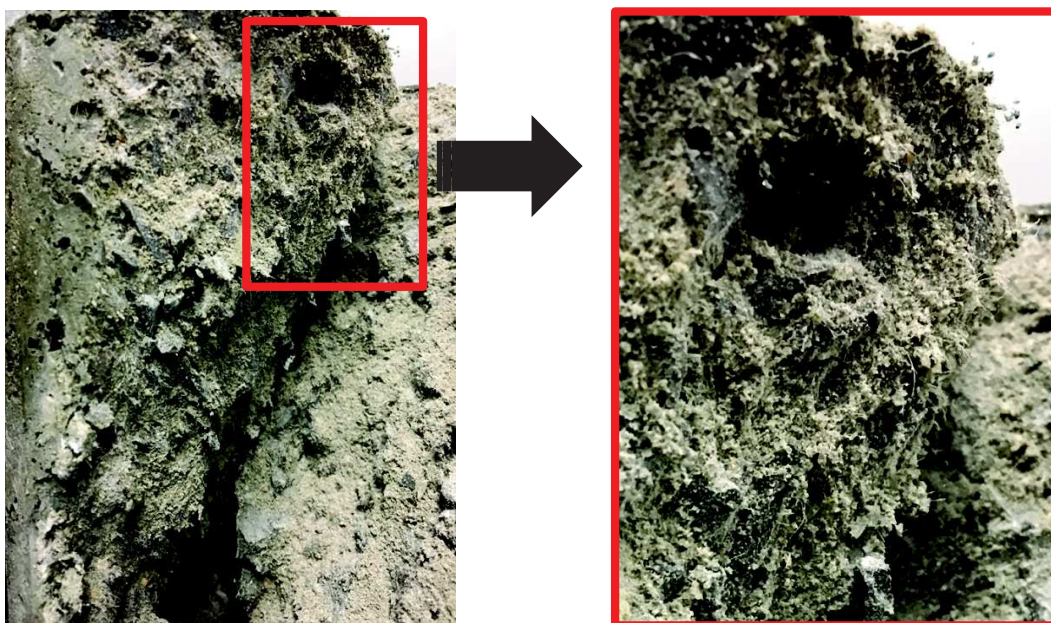
Diferentemente disso, as misturas C-PP+PVA e C-PP+POL evidenciaram um comportamento semelhante, quando, após o 9º dia de ensaio, mantiveram as deformações regulares por 96 horas. Nos exemplares de C-PP+POL foi possível identificar o combate dos reforços na propagação da fissura, pelo fato de haver picos de deformação de maneira consecutiva. Porém, nessa mistura as fissuras foram constatadas aos 10 dias de ensaio.

Interpretando os resultados mecânicos com os valores obtidos na retração por secagem de cada mistura híbrida, verifica-se que a energia necessária para promover a ruptura dos compósitos reforçados com microfibras foi superior ao do concreto referência. Logo, a capacidade de resistir a esforços mais elevados já era esperada. Assim a matriz apresentou maior resistência no aumento das deformações por retração.

Os compósitos com a microfibra reciclada de POL apresentaram resultados superiores, pelo fato do reforço obter compatibilidade dimensional com os agregados graúdos da mistura. Mas, mesmo apresentando maior tenacidade, tanto as amostras de C-PVA+POL, quanto C-PP+POL apresentaram fissuras em um período próximo aos 10 dias. Já as misturas C-PP+PVA postergaram o aparecimento da abertura até o 15º dia. Essa diferenciação está relacionada às propriedades mecânicas do reforço, a zona de interface dos mesmos e aos estágios de acionamento de cada reforço, conforme elevam-se as tensões internas do material.

A Figura 67 retrata a formação da malha e a distribuição das microfibras de PP e PVA na matriz cimentícia.

Figura 67 – Distribuição das microfibras de PP e PVA na matriz cimentícia

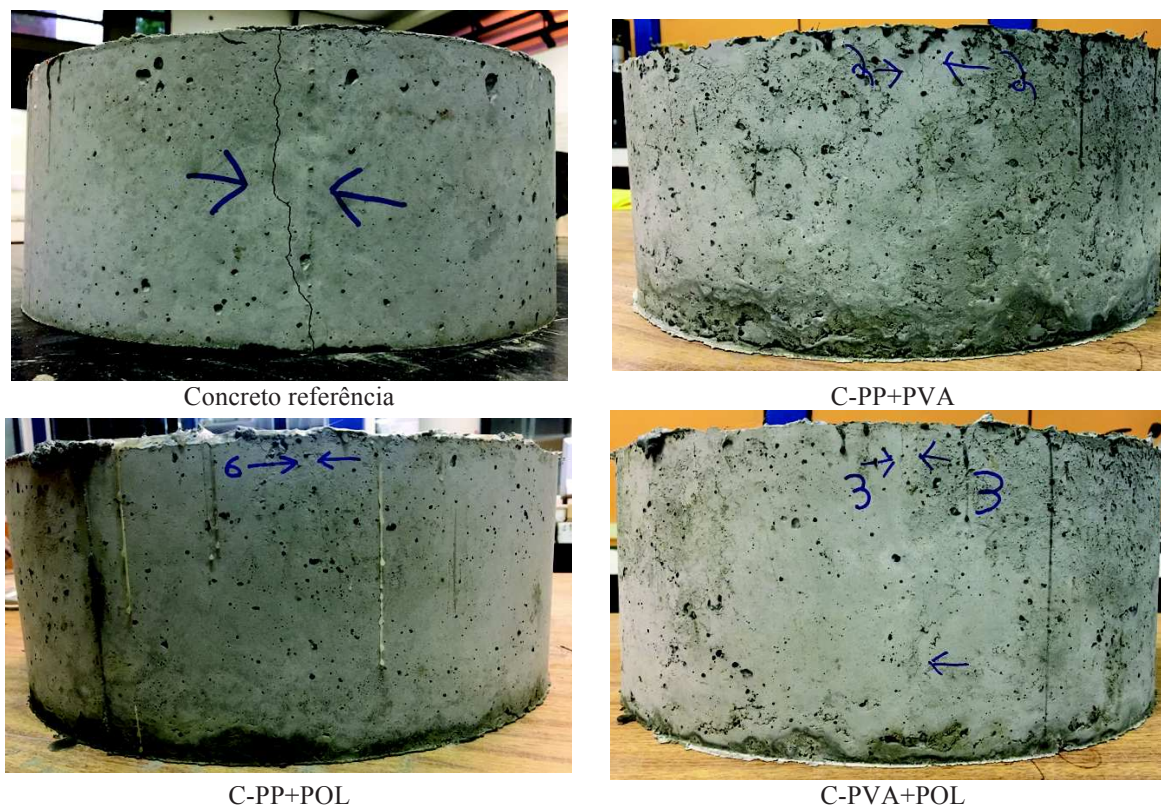


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os reforços em PP e PVA abrangeram a distribuição dos reforços por toda a matriz, aumentando sua área de atuação, e aproximando um reforço ao outro, criando uma malha densa e refinada. Diante disso, mesmo as microfissuras puderam ser combatidas, tendo a ação imediata dos reforços. A análise fenomenológica apresentada também pode ser evidenciada nas misturas C-PP e C-PVA da primeira etapa, que também atingiram idades elevadas de fissuração pelo refinamento dos reforços.

A Figura 68 retrata a forma de fissuração dos concretos estudados na segunda etapa.

Figura 68 – Amostras dos concretos após término do ensaio de retração pelo método do anel



Fonte: Elaborado pelo autor.

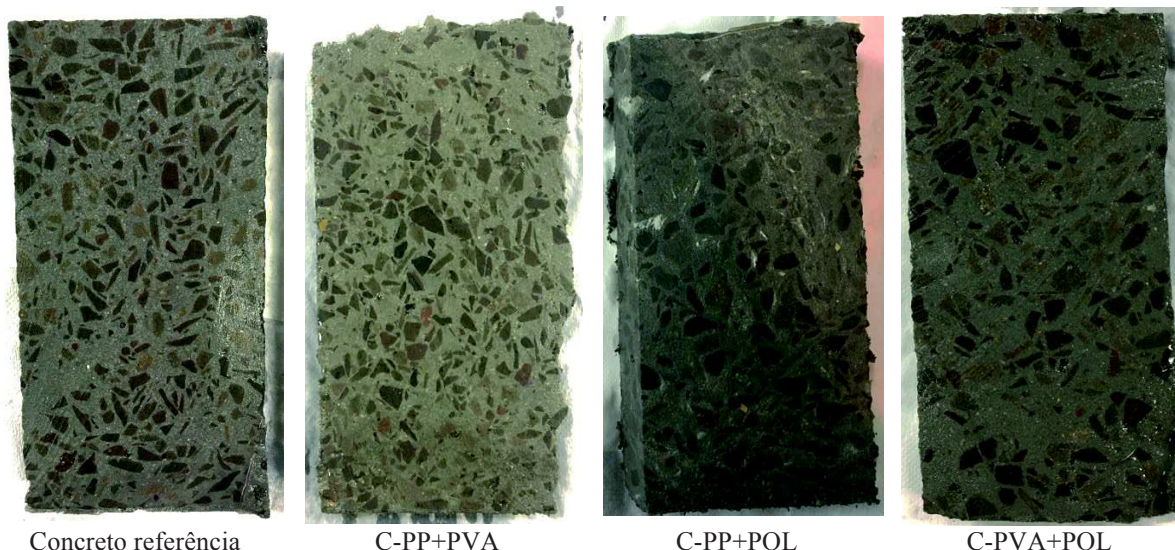
Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Os resultados dessa etapa foram semelhantes aos identificados na etapa 1. Todas as fissuras nuclearem-se no sentido vertical e propagaram-se da base até o topo. A forma de ruptura já era prevista, pois as solicitações mecânicas no exemplar anelar ocorreram no sentido perimetral ao mesmo, tracionando a borda externa e comprimindo a interna.

Apresentando aspectos próximos aos encontrados na etapa 1, destaca-se a mudança do acabamento superficial dos anéis para cada tipo de compósito. O concreto referência, devido à sua fluidez, permitiu que não houvesse vazios de concretagem e outras falhas de moldagem. Já nos compósitos com hibridização das microfibras o acabamento das faces foi prejudicado, pelo fato do adensamento das misturas ser dificultado com a inserção dos reforços, conforme explicam Maciel et al. (2015). Dentre os concretos com microfibras analisados na etapa 2, os que obtiveram maiores falhas na superfície do exemplar foram o C-PVA+POL e C-PP+PVA. As amostras da mistura C-PP+POL apresentaram aparência semelhante ao concreto referência, visto que suas propriedades no estado fresco atingiram valores satisfatórios.

Nas seções em que se procederam as fissuras, retirou-se um exemplar com o intuito de verificar o teor de agregados graúdos presente na seção coletada. A Figura 69 apresenta os exemplares do concreto referência e com hibridização de microfibras.

Figura 69 – Seção longitudinal dos concretos



Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

As imagens das seções longitudinais de cada amostra anelar foram utilizadas como fator de verificação da distribuição granulométrica dos agregados graúdos, assim como o teor de concentração dos mesmos nas áreas em análises. Foi possível observar similaridade entre a distribuição do concreto referência e da amostra C-PP+PVA, os quais, visualmente, possuíam teores de agregados próximos e dispersos homogeneamente na matriz. Na etapa 1, verificou-se que a inserção das microfibras prejudicou a distribuição dos agregados, devido a restrição ocasionada pela malha de restrição interna. Todavia, a hibridização com fibras de PVA e PP melhorou a homogeneização dos insumos na matriz.

As amostras C-PVA+POL e C-PP+POL obtiveram resultados distintos dos demais. Tais comportamentos foram semelhantes aos compósitos da etapa 1. Por meio da Figura 69, nota-se que essas amostras não apresentaram uniformidade na distribuição dos agregados graúdos, sendo possível observar áreas somente com a presença de pasta.

A Tabela 26 apresenta os quantitativos dos materiais na seção dos exemplares coletados.

Tabela 26 – Composição dos materiais na seção das misturas na etapa 2

Compósito	Teor médio de agregados graúdos (%)
REF	30,41
C-PP+PVA	22,18
C-PP+POL	21,47
C-POL+PVA	27,86

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster (70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Com os valores ilustrados na Tabela 26, observa-se que a inserção de microfibras na matriz cimentícia proporcionou a alteração do teor de agregados graúdos nas seções anelares analisadas. A diminuição do volume de agregados nos compósitos reforçados com microfibras híbridas está relacionada ao movimento restrito dos agregados no interior da mistura, devido a criação da malha multidirecional criada pelos reforços, conforme também foi visto na etapa inicial. Dessa forma, há dificuldade em proporcionar uma distribuição homogênea dos agregados graúdos no interior das amostras.

4.3 Potencial de fissuração

A partir dos resultados de retração por secagem das misturas, as mesmas podem ser classificadas frente ao seu potencial de fissuração. Elaborou-se a Tabela 27 para expôr os resultados de potencial de fissuração dos concretos ensaiados no estudo.

Tabela 27 – Classificação do potencial de fissuração dos compósitos

Concreto	Alívio de tensão (dias)	Deformação média máxima ($\mu\text{m/m}$)	Taxa de tensão média (MPa/dia)	Potencial de fissuração
Referência	10	33,94	0,6958	Alto
C-PP	8	31,19	0,7992	
C-PVA	13	53,74	0,8474	
C-POL	8	43,62	1,1177	
C-PP+PVA	13	47,39	0,7473	
C-PP+POL	10	49,25	1,0096	
C-POL+PVA	8	38,80	0,9942	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Legenda: (C-PP) concreto reforçado com microfibras de polipropileno; (C-POL) concreto reforçado com microfibras recicladas de poliéster; (C-PVA) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico; (C-PP+PVA) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e álcool polivinílico (70%); (C-PP+POL) concreto reforçado com microfibras de polipropileno (30%) e recicladas de poliéster

(70%); (C-PVA+POL) concreto reforçado com microfibras de álcool polivinílico (50%) e recicladas de poliéster (50%).

Analisando os resultados retratados na Tabela 27, observa-se que todos os compósitos estudados na pesquisa atingiram alto potencial de fissuração. Identifica-se que a inserção de fibras não proporcionou a mudança de classificação da matriz referente ao seu potencial de fissuração e aumentou a taxa de tensão média do sistema.

As misturas contendo as microfibras recicladas de poliéster obtiveram as maiores taxas de tensão média da pesquisa, tendo os seus valores próximos a 1,00 MPa/dia. Em relação à matriz referência, houve o aumento de 40% na tensão média diária com a utilização dessas microfibras. Quando as fibras em POL foram aplicadas de maneira isolada, os resultados potencializaram-se, atingindo a faixa de 1,10 MPa/dia. Tal comportamento pode estar associado a ocorrência de falhas internas e o aumento de vazios na matriz. Já com a hibridização, diminuí-se as tensões geradas pela retração restringida a cada dia de ensaio.

Em função dos concretos com utilização das microfibras de PP e PVA, as taxas de tensão médias permanecendo entre 0,75 a 0,85 MPa/dia. No compósito C-PP+PVA obteve-se a menor taxa de tensão da pesquisa. Os resultados dos compósitos C-PP, C-PVA e C-PP+PVA interligam-se com a eficiência que cada tipo de reforço proporcionou à matriz, como o refinamento da malha e aumento da área de atuação, o que dificultou a propagação das fissuras, postergando a constatação visual das mesmas.

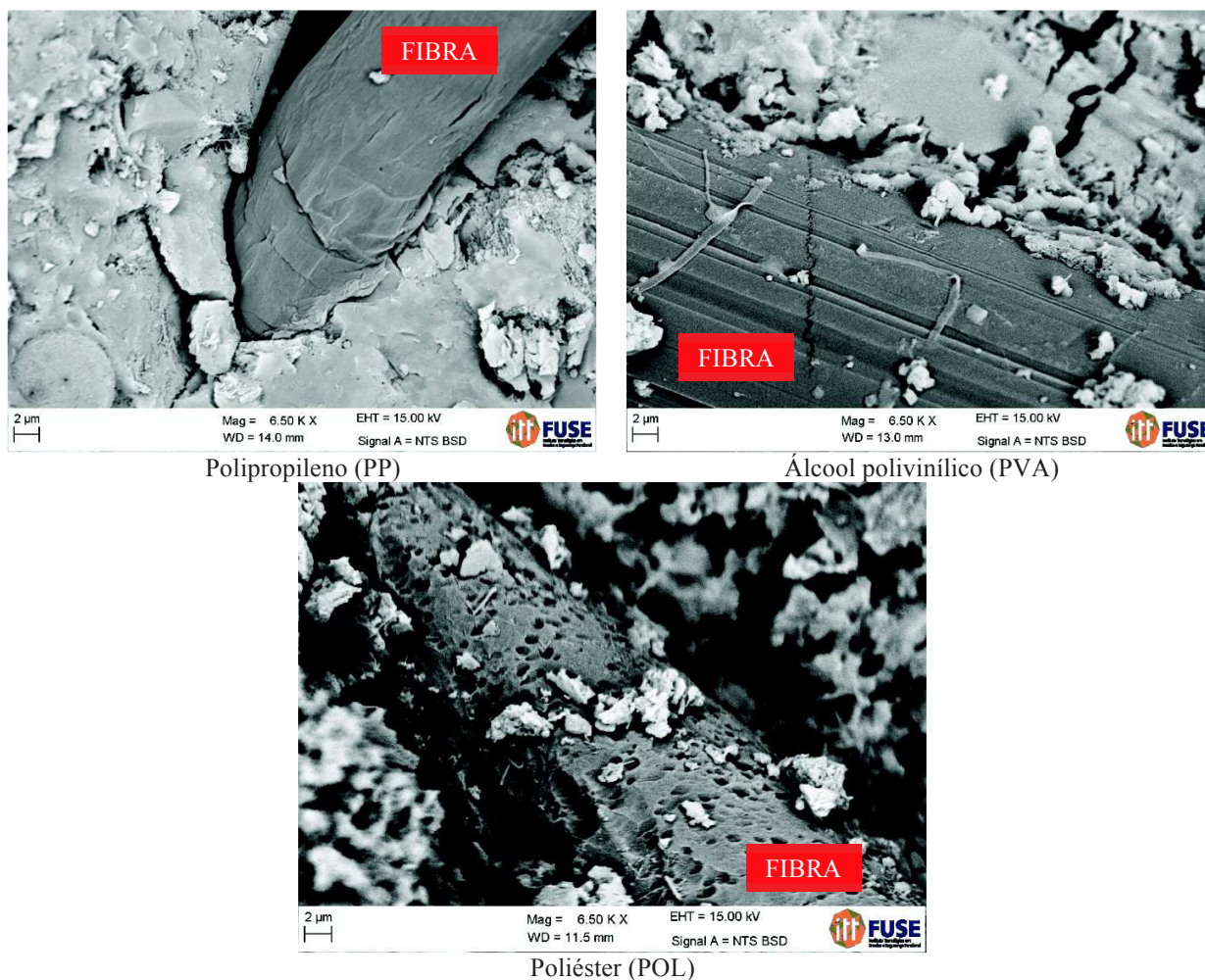
Esperava-se que a utilização das microfibras proporcionasse a diminuição do potencial de fissuração da matriz cimentícia, todavia, isso não ocorreu pelo fato da inserção das fibras aumentar a retração por secagem do sistema e, em alguns casos, proporcionar a fissuração da matriz antes dos 10 dias de ensaio. Observa-se que a idade de formação da fissura nos compósitos com fibras ocorreu antes da matriz sem reforço. Mas o comportamento dessas misturas pós-fissuração alterou-se, sendo que a propagação das fissuras foi controlada com a presença das microfibras e, por sua vez, postergando a constatação visual dessa manifestação patológica. Outro fator ponderador é a própria matriz cimentícia, a qual foi dosada para favorecer a retração por secagem e, conseqüentemente, obter alto potencial de fissuração.

4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Esse item apresenta os resultados obtidos por meio dos ensaios utilizando o método de microscopia eletrônica de varredura (MEV), tendo as análises realizadas 28 dias após a moldagem das amostras anelares. As alterações morfológicas de cada reforço, quando imerso

na matriz cimentícia, podem ser vistas na Figura 70, além da zona de interface de cada microfibras com matriz e a distribuição das mesmas no sistema.

Figura 70 – Interação dos reforços com a matriz cimentícia



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os reforços de POL utilizados na pesquisa, ao entrarem em contato com o meio alcalino proporcionado pelo pH da matriz, apresentaram degradações na sua estrutura. A exposição a um pH próximo a 12 fez com que a fibra sofresse o desprendimento do material constituinte e tornou-se extremamente poroso. Houve completa conformação da sua área superficial, fragilizando-o e prejudicando seu desempenho nos ensaios realizados. O restante das microfibras não foi prejudicado, mantendo seu formato e eficiência. Tais resultados também foram identificados por Balaguru e Slattum (1995).

Ainda, analisando a zona de interface entre as microfibras de PP e POL, observa-se que há um espaço vazio entre o elemento e a matriz. Segundo Bentur e Mindess (2007), esse fenômeno ocorre na zona de transição entre a pasta e os agregados no concreto. Visto que esses

reforços não absorveram a água da mistura, a mesma permaneceu no entorno da fibra, devido as forças de Van der Waals, aumentando a relação água/cimento, que, por sua vez, a tornou um ponto frágil.

Todavia, as fibras de PVA apresentaram uma zona de interface muito inferior às demais. A diminuição da zona de interface nas fibras de PVA está associada às características químicas do material. Segundo Li et al. (2004) e Noushini et al. (2013), a eficiência das fibras de PVA em matriz cimentícias relaciona-se, principalmente, com a sua ligação química à pasta de cimento, como é o caso visto na Figura 70, onde, aparentemente, não há a zona de interface. Dessa maneira, é possível comprovar o desempenho satisfatório desse reforço na matriz estudada frente aos demais compósitos com microfibras de PP e POL.

A fim de ilustrar a ligação entre o PVA e a pasta cimentícia, aproximou-se em 15.000 vezes o ponto de união desses insumos (vide Figura 71).

Figura 71 - Interface entre a microfibra de PVA e a matriz cimentícia

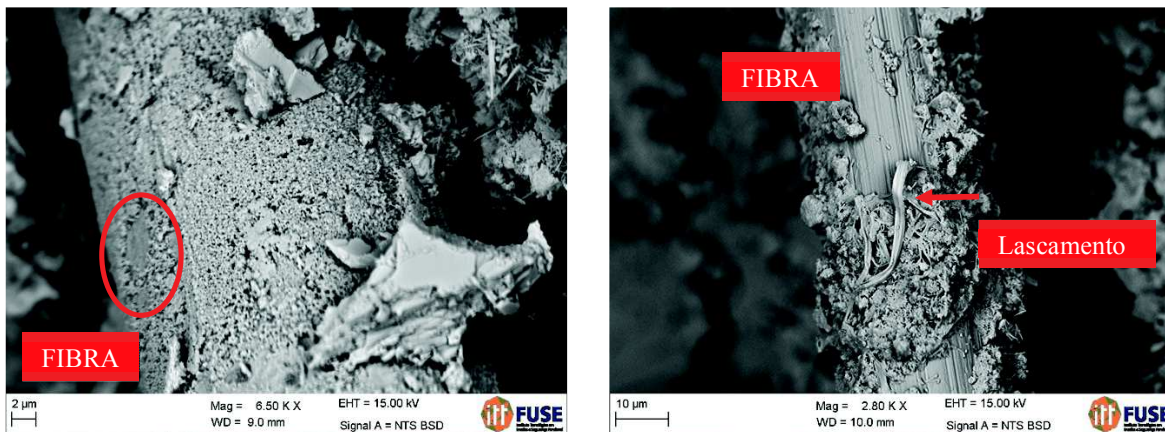


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 71 é possível constatar a conformação superficial da fibra nas áreas em contato com a pasta cimentícia. Tal comportamento ocorreu, devido a ligação química entre os materiais por meio dos hidróxidos presentes, tanto no compósito, quanto no material. Dessa maneira, as forças de atração provocaram a ligação entre os materiais, gerando mudanças físicas na superfície do reforço. Também se evidenciou a ausência de zona de interface, mesmo aproximando 15.000 vezes as imagens.

A Figura 72 apresenta a ligação da matriz cimentícia com a microfibra de PVA.

Figura 72 – Pontos de interação entre a microfibras de PVA e a matriz cimentícia



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível verificar uma camada da pasta aderida na superfície do reforço, evidenciando a compatibilidade química entre a mistura e a fibra. Além dos fatores apontados, na mesma imagem observa-se o desprendimento do material da microfibras, devido a retirada da camada de pasta retida em sua superfície. Essa anomalia ocorreu devido a força de interação entre a microfibras e a pasta de cimento hidratada, comprovando que o ponto frágil do compósito com PVA é o elemento de reforço e não a zona de interface, pois a resistência de ligação é maior que a do reforço polimérico.

5 CONCLUSÕES

Esse estudo avaliou o comportamento de compósitos cimentícios com e sem inserção de microfibras quanto as propriedades relacionadas a retração por secagem das misturas, bem como as propriedades mecânicas de cada concreto. O teor de adição dos reforços, 0,50% em função do volume, a aplicação de microfibras de PP, PVA e POL foram avaliados frente ao impacto que geram no potencial de fissuração e deformações devido a retração por secagem da matriz analisada. Também foram verificadas as propriedades mecânicas dos compósitos e interação de cada reforço com a matriz cimentícia (zona da interface). Com isso, a partir do programa experimental proposto para a pesquisa foi possível obter as seguintes conclusões:

A. Quanto aos critérios de avaliação da retração por secagem:

- As deformações médias máximas mensuradas na matriz referência foram as menores da pesquisa. Com a adição de fibras em PVA e POL, as deformações aumentaram consideravelmente, superando em até 100% os valores identificados no concreto referência. A inserção de fibras em PP manteve as mesmas deformações da matriz sem reforço;
- Os compósitos com hibridização de fibras ainda mantiveram deformações elevadas na mistura, porém equalizaram os valores e tornando-os mais semelhantes;
- A adição de microfibras na matriz cimentícia proporcionou alívios de tensão mais suaves à mistura em relação ao concreto referência, alterando a forma de fratura do sistema. Os reforços que obtiveram melhores resultados nesse quesito foram o PVA e PP. As microfibras recicladas de POL diminuíram a amplitude do alívio gerado na nucleação da fissura, porém ainda era perceptível o alívio brusco no sistema.
- O concreto referência apresentou uma das maiores idades de fissuração da pesquisa, ou seja, a nucleação da abertura ocorreu aos 13 dias de ensaio;
- Para os compósitos reforçados com microfibras, as misturas com melhores resultados foram as com utilização isolada de PP e PVA, as quais atingiram idades de fissuração equivalentes a 14 e 15 dias após início dos ensaios. Já o concreto com POL fissurou aos 9 dias de idade;

- A hibridização dos reforços não proporcionou grandes alterações nas idades de fissuras das matrizes, sendo os resultados semelhantes aos compósitos com inserção simples das microfibras;
- As dimensões das fissuras encontradas no concreto referência foram de 0,4 mm e a inserção de fibras proporcionou a diminuição da abertura para menos de 0,05 mm;
- Em termos de resistência aos esforços internos de tração, a matriz referência suportou até 6 MPa de resistência à tração pelo método de anel. Já os compósitos com fibras foram capazes de superar esforços na escala de 10 a 12 MPa. Sendo assim, a inserção de fibras proporcionou o aumento da resistência aos esforços de tração internos da matriz e manteve a fissura 8 vezes menor em função do concreto referência.

B. Quanto às propriedades:

- A resistência à compressão axial da matriz referência foi a maior da pesquisa, atingindo 35,7 MPa para a condição de cura C1. Já a resistência média atingida pelas matrizes reforçadas com microfibras foi sensivelmente reduzida, estando em torno dos 32 MPa para as mesmas condições;
- A microfibra de PP foi o reforço que apresentou os resultados mais negativos da pesquisa. As microfibras de PVA atingiram os maiores resultados, tanto na cura C1, quanto na cura C2;
- A inserção de fibras melhorou as condições de cura da matriz, mostrando-se eficiente em ambientes com umidade reduzida, visto que mantém a umidade interna na matriz, evitando a saída repentina da mesma ao ambiente externo;
- Na condição de cura C1, o módulo de elasticidade dos compósitos com fibras simples e o referência são semelhantes, sem obter variações consideráveis. Já com a hibridização, o módulo de elasticidade foi reduzido visivelmente.
- As microfibras não proporcionaram o aumento da resistência à tração da mistura.
- O teor de adição adotado prejudicou a moldagem das amostras prismáticas para o ensaio de resistência à tração na flexão, o que pode explicar os resultados obtidos;
- O fator de tenacidade das misturas foi alterado com a inserção das microfibras poliméricas. Nos compósitos simples, o valor permaneceu em um intervalo de 8 a 12,50 kgf/cm². Já as matrizes com hibridização sofreram queda no fator

passando para 5,00 a 9,50 kgf/cm². A matriz referência obteve fator de tenacidade igual a 0,32 kgf/cm²;

C. Quanto as análises microscópicas:

- As microfibras compostas por PVA possuem ótima relação com a matriz cimentícia, obtendo uma zona de interface infinitamente menor quando compara aos demais reforços. É possível verificar uma forte interação química entre o PVA e a matriz cimentícia;
- Os reforços em PVA apresentavam maior quantidade de pasta cimentícia aderida, quando comparados às microfibras de PP e POL, o que denota uma interação mais interessante por parte das fibras em PVA;
- As microfibras de POL são fortemente atacadas quando imersas em meio alcalino, apresentando elevada taxa de degradação. Já os reforços em PP e PVA não sofrem alteração na morfologia até a idade de ensaio.

De maneira geral, salienta-se que a utilização de microfibras poliméricas em concretos elevou a retração por secagem da matriz referência, potencializando o processo de fissuração da mesma, como foi possível perceber nas misturas com utilização de fibras de POL. As microfibras em PP e PVA, diferentemente das de POL, mostraram boas alternativas de reforços na contenção de fissuras por retração. Analisando os comportamentos das misturas, a inserção de reforços aumentou a retração por secagem, todavia sua resistência aos esforços internos de tração foi muito superior ao concreto referência. Em determinados casos, os esforços concentrados chegaram a 12 MPa (PVA) e foram suportados com êxito. Já o concreto referência foi submetido a esforços de 6 MPa, os quais o levaram à fissuração. Além dos compósitos com fibras resistirem aos maiores esforços, as fissuras nucleadas atingiram aberturas 8 vezes menores das criadas nas amostras do concreto referência.

Relacionada às propriedades mecânicas, a inserção de fibras de maneira isolada e híbrida alterou sensivelmente os valores de tais características, quando comparadas às da matriz referência. Todavia, a mistura com o uso de fibras isoladas de PP prejudicou em até 30% a resistência à compressão axial e também por obter o pior resultado de resistência à tração na flexão da pesquisa.

Por fim, é notório o desempenho eficiência dos reforços em PVA nas propriedades em que foram analisados, atingindo resultados superiores aos demais reforços e tornando-se um material com potencial para a implementação na construção civil. É possível elencar tal fibra como um possível insumo a ser utilizado na melhoria das propriedades do concreto no seu estado endurecido e atuar como mitigador das fissuras nucleadas devido a retração por secagem.

Reforços com essas propriedades físicas e, principalmente, químicas mostram-se cada vez mais evoluídos tecnologicamente e desenvolvidos para obterem o melhor desempenho, assim como visto na pesquisa apresentada.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Avaliar a retração por secagem e propriedades mecânicas das mesmas misturas utilizadas na pesquisa, variando os teores de adição das microfibras de PP, POL e PVA (300 g/m^3 , 600 g/m^3 e 1200 g/m^3);
- Analisar a retração por secagem restringida de concretos com o uso do método de anel em comparação com o método das placas;
- Relacionar a retração por secagem com a inserção de microfibras e o impacto na porosidade e massa específica do compósito;
- Explorar com maior profundidade o potencial das fibras de POL, PP e PVA como agentes que auxiliam na cura do concreto;
- Aumentar o número de extensômetros no interior do anel, passando para 4 pontos de medição. Além de instrumentar internamente, fazer a instalação de 4 extensômetros na face externa do sistema, ou seja, no anel de concreto.

REFERÊNCIAS

ABABNEH, A. M. The damage of concrete structures due to coupled moisture transfer and drying shrinkage. *Proceedings of the 2001 ASCE Structures Congress and Exposition*. Washington, DC, 2001.

AİTCIN, P. C. **Cements of yesterday and today Concrete of tomorrow**. 2000. n. 30, p. 1349– 1359.

AKERS, S. A. S., STUNDIKA, J. B., MEIER, P., DOBBT, M. G., JOHNSONT, D. J., HIKASA, J. Long term durability of PVA reinforcing fibres in a cement matrix.

ALTUN, F.; TANRIOVEN, F.; DIRIKGIL, T. Experimental investigation of mechanical properties of hybrid fiber reinforced concrete samples and prediction of energy absorption capacity of beams by fuzzy-genetic model. **Construction and Building Materials**, 44 (2013), pp. 565–574.

ALY, T.; SANJAYAN, J. G.; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, 41 (2008), n. 10, pp. 1741-1753.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 211.3R-02 *Standard practice for selecting proportions for normal, heavy weight and mass concrete.. ACI Committee 211* (Reaprovado 2009), Detroit, USA, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 544.1R-96 *Report on Fiber Reinforced Concrete. ACI Committee 544* (Reaprovado 2009), Detroit, USA, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. C1581/1581M, ASTM*, Pennsylvania, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. NBR NM 53, ABNT*, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. NBR NM 52, ABNT*, Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. NBR NM 45, ABNT*, Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. **NBR NM 248, ABNT**, Rio de Janeiro, 2003.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica*. **NBR NM 23, ABNT**, Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland pozolânico*. **NBR 5736, ABNT**, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. **NBR NM 67, ABNT**, Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Determinação do módulo elástico de elasticidade à compressão*. **NBR 8522, ABNT**, Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto – Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. **NBR 5739, ABNT**, Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento*. **NBR 12655, ABNT**, Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Execução de concreto dosado em central – Procedimento*. **NBR 7212, ABNT**, Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Fibras de aço para concreto – Especificações*. **NBR 15530, ABNT**, Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Cimento Portland Composto*. **NBR 11578, ABNT**, Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por*

fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. **NBR 16137, ABNT**, Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos*. **NBR 11768, ABNT**, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Aditivos para argamassa e concreto – Ensaios de caracterização*. **NBR 10908, ABNT**, Rio de Janeiro, 2008.

BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. **Fiber reinforced cement composites**. Mc Graw Hill Book Co, New York, 1992.

BALAGURU, P.N.; SLATTUM, K. Test methods for durability of polymeric fibers in concrete and UV light exposure. **ACI Materials Journal**, v. 148 n.1 (1995), pp. 115–136.

BALAGURU, P. N.; RAMAKRISHNAN, V. Properties of fiber reinforced concrete: workability, behavior under long-term loading, and air-void characteristics. **Materials Journal**, 85 (1988), pp. 189-196.

BANGI, M. R.; HORIGUCHI, T. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**. 42 (2012), pp. 459-466.

BANTHIA, N.; MONCEF, A.; CHOKRI, K.; SHENG, J. Uniaxial tensile response of microfiber reinforced cement composites. **Materials and Structures**, 28 (1995), pp. 507-517.

BANTHIA, N.; SHENG, J. Fracture toughness of Micro-Fiber reinforced cement composites. **Cement & Concrete Composites**, 18 (1996), pp. 251-269.

BANTHIA, N.; GUPTA, R. Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): fiber synergy in high strength matrices. **Materials and Structures**, 37 (2004), pp. 707-716.

BARR, B. I. G.; EVANS, W. T.; DOWERS R. C. Fractur toughness of polypropylene fibre concrete. **The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, 3 (1981), n. 2, pp. 115-122.

BARR, B.; ASGHARI, A.; HUGHES, T. G. Tensile strength and toughness of FRC materials. **The international Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, 10 (1988), n. 2, pp. 101-107.

BARGHIGIANI, T. M. **Caracterização experimental de pastas cimentícias de alto desempenho reforçadas com fibras de polipropileno e PVA**: 2013. 143 f. COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BEBER, A. J. **Comportamento Estrutural de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com Compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 317 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2003.

BECKER, D.; KLEINSCHMIDT, A. C.; BALZER, P. S. Compósitos de PVC rígido e fibras de bananeira: Efeito do tratamento da fibra. **Revista Materia**, v. 19, n. 3, pp. 257–265, 2014.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced cementitious composites**. United Kingdom: Barking, Elsevier, 1990.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Taylor & F ed. New York: Taylor & Francis, 2007.

BENTZ, D. P.; WEISS, J. W. REACT: **Reducing early-age cracking today**. Concrete Plant International, mai. 2008.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de aramida kevlar**: 2003. 179 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, RS, Brasil.

BISSCHOP, J., SHIOTANI, T., VAN MIER, J. G. M. Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. **Engineering Fracture Mechanics**, 70 (2003), n. 12, pp. 1509-1525.

BISSONNETTE, B.; PIERRE, P.; PIGEON, M. Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, 29 (1999), n. 10, pp. 1655-1662.

BOGHOSSIAN, E.; WEGNER, L. D. Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, pp. 929–937, 2008.

BREÑA, S. F.; MCGUIRK, G. N. Advances on the Behavior Characterization of FRP-Anchored Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Sheets Used to Strengthen Concrete Elements. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 1, pp. 3–16, 2013.

BRUNAUER, S.; COPELAND, L. E. The chemistry of concrete. **Scientific American**, 210 (1964), n. 4, pp. 80-92.

BS EN EUROCODES, 12350-3 *Testing fresh concrete Part 3: Vebe test*, **BS EN**, Reino Unido, 2009.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 5a. Edição. Rio de Janeiro, 2002.

CARINO, N. J.; CLIFTON, J. R.. Prediction of cracking in rein- forced concrete structures. Technical Report No. NISTIR 5634, **Building and Fire Research Laboratory**, National Institute of Standards and Technology, MD, 1995.

CARMONA FILHO, A., CARMONA, T., **Fissuração nas estruturas de concreto**. Boletim Técnico ALCONPAT Internacional, 2013.

CECCATO, M. R. Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço. 1998. 98 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - USP (Universidade de São Paulo), São Paulo, SP, Brasil.

CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. 2014. 114 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - UNISINOS (Universidade do Vale do Rio dos Sinis), São Leopoldo, RS, Brasil.

CORTAS, R. et al. Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age. **Cement and Concrete Composites**, v. 50, pp. 1–9, 2014.

DANTAS, F. A. S. **Concretos de baixo consumo de cimento reforçados com fibras - propriedades e análise da fissuração devido à retração**. 1987. 214 f. Tese (doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

DAWOOD, E.; RAMLI, M. Mechanical properties of high strength flowing concrete with hybrid fibers, **Construction and Building Materials**, 28 (2011), n. 1, pp. 193–200.

DESNERCK, P.; LEES, J. M.; MORLEY, C. T. Bond behaviour of reinforcing bars in cracked concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, pp. 126–136, 2015.

DONG, W.; ZHOU, X.; WU, Z. A fracture mechanics-based method for prediction of cracking of circular and elliptical concrete rings under restrained shrinkage. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 131, pp. 687–701, 2014.

EHRENBRING, H. Z. **Determinação do potencial de fissuração de concretos convencionais e concretos com adição de fibras de poliéster devido a retração por**

secagem. 2016. 121 f. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil - Escola de Engenharia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, Brasil.

EHRENBRING, H. Z.; TUTIKIAN, B. F.; QUININO, U. Comparação da retração por secagem entre concretos convencionais e com adição de fibras de poliéster. **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**, Anais de congresso, abril 2016, pp. 789-800.

FATHIFAZL, G. et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 10, pp. 1026–1037, 2011.

FELDMAN, R. F. The porosity and pore structure of hydrated portland cement paste. **National Research Council Canada**, Institute for Research in Construction, 1989

FELDMAN, R. F.; SEREDA, P. J. A new model for hydrated portland cement and its practical implications. **Engineering Journal, Ottawa**, (1970), pp. 52-59.

FÉLIX, A. H. O. **Compósitos de polipropileno com fibra de vidro utilizando viniltriatoxisilano como agente de adesão**. 2002. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**: 2000. 70 f. Boletim Técnico - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia de Construção, São Paulo, SP, Brasil.

FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno (CFP). **Revista Técnica**, 66 (2002), n. 9, pp. n.d.

FIGUEIREDO, A. D. A nova especificação brasileira das fibras de aço para concreto In: **50º Congresso Brasileiro do Concreto**, Salvador, 2008. Anais. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras**: 2011. 256 f. Tese de Livre Docência - USP (Universidade de São Paulo), São Paulo: [s.n.].

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. **Materials Research**, 18 (2015), n. 6, pp. 1284-1290.

FILHO, A. C.; CARMONA, T. Fissuração nas estruturas de concreto. **Boletín Técnico Alconpat Internacional**, v. 1, 2013.

GAO, Y.; ZHANG, J.; HAN, P. Determination of stress relaxation parameters of concrete in tension at early-age by ring test. **Construction and Building Materials**, 41 (2013), pp. 152-164.

GRASLEY, Z. C.; DAMBROSIA, M. D. Viscoelastic properties and drying stress extracted from concrete ring tests. **Cement and Concrete Composites**, v. 33 (2011), n. 2, pp. 171–178.

GOODIER CI, **Development of self-compacting concrete**. 2003.

GRAM, H. E. Durability of natural fiber in concrete. **Swamy RN**, (1988), pp. 143 – 172.

GRANGER, L.; TORRENTI, J. M.; ACKER, P. Thoughts about drying shrinkage: experimental results and quantification of structural drying creep. **Materials and Structures**, 30 (1997), pp. 588–598.

GRISON, E. C.; HOINACKI, E. **Identificação de Materiais Poliméricos: Via Úmida**. Fundação de Ciência e Tecnologia: Porto Alegre, 1985.

GU, C.; GUANG, Y.; SUN, W. A review of the chloride transport properties of cracked concrete: experiments and simulations. **Journal of Zhejiang University Science A**, v. 16, n. 2, pp. 81–92, 2015.

HAMOUSH, S.; ABU-LEBDEH, T.; CUMMINS, T. Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 11, pp. 2285–2293, 2010.

HANNANT, D. J. **Fiber Cements and Fiber Concretes**. Guilford, United Kingdom: John Wiley & Sons, 1978.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Geraldo Ce ed. São Paulo: IBRACON, 2010. pp. 905–944.

HOLT, E. E. Early age autogenous shrinkage of concrete. **VTT Publications**, n. 446, pp. 2–184, 2001.

HSIE, M.; TU, C.; SONG, P. S. Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber- reinforced concrete. **Materials Science and Engineering A**, 494 (2008), n. 1-2, pp. 153-157.

JAMERAN, A. et al. Mechanical Properties of Steel-polypropylene Fibre Reinforced Concrete Under Elevated Temperature. **Procedia Engineering**, v. 125, pp. 818–824, 2015.

JANSSON, R. **Fire spalling of concrete: theoretical and experimental studies**. Tese de doutorado em Engenharia Civil. Estocolmo: KTH Vetenskap Och Konst, 2013.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, SF4 – *Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete*, **JSCE**, Toquio, Japan, 1984.

JUAREZ, C. A. et al. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement-based composite. **Construction and Building Materials**, v. 91, pp. 164–170, 2015.

KARP, G. **Biologia celular e molecular: conceitos e experimentos**. Barueri, Editora Manole Ltda., 2005.

KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, 26 (2004), n. 5, pp. 541–549.

KIRCHHOF, L. D. **Estudo teórico-experimental da influência do teor de umidade no fenômeno de spalling explosivo em concretos expostos a elevadas temperaturas**. 2010.

262 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil.

KLINGSCH, E. W. H. **Explosive spalling of concrete in fire**. Tese de doutorado, ETH Zurich, 2014.

KRAAI, P. P. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete. **Concrete Construction**, 30 (1985), n. 9, pp. 775-778.

KURDOWSKI, W. **The Chemistry of Cement and Concrete**. Springer, Netherlands, 2014.

LAWLER, J. S., WILHELM, T., ZAMPINI, D., SHAH, S. P. Fracture process of hybrid fiber-reinforced mortar. **Materials and Structures**, 36 (2003), pp. 197-208.

LEE, B. Y. et al. Quantitative evaluation technique of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber dispersion in engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 6, pp. 408–417, 2009.

LERTWATTANARUK, P.; SUNTIJITTO, A. Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. **Construction and Building Materials**, v. 94, pp. 664–669, 2015.

LI, C. V.; WU, C.; WANG, S.; OGAWA, A.; SAITO, T. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC). **ACI Materials Journal**, 99 (2002); pp. 463–472.

LI, X.; TABIL, L.G.; PANIGRANI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber- reinforced composites: A review. **Journal Polymer Environmental**. 15 (2007), pp. 25-33.

LI, V. C. et al. Micromechanics-based durability study of polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 3, pp. 242–248, 2004.

MACIEL, M. H.; TORRES, D. R.; SAKANO, V. K.; ROMANO, R. C.; PILEGGI, R. G.; FIGUEIREDO, A. D. Influência do tipo de fibra nas propriedades reológicas e no estado endurecido de concretos. **Anais do 57º Congresso Brasileiro do Concreto**, Bonito/MS, 2015.

MANGAT, P. S. E.; SWAMY, R. N. Compactibility of steel fibre reinforced concrete. **Concrete (London)**, 8 (1975), pp. 34-35.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2. ed, 2000.

MARTINELLI, E.; CAGGIANO, A.; XARGAY, H. An experimental study on the post-cracking behaviour of hybrid industrial/recycled steel fibre-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, pp. 290–298, 2015.

MAZZOLI, A.; MONOSI, S.; PLESCIA, E. S. Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods. **Construction and Building Materials**, v. 101, pp. 596–601, 2015.

MAZZOTTI, C.; SAVOIA, M.; FERRACUTI, B. A new single-shear set-up for stable debonding of FRP-concrete joints. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 4, pp. 1529–1537, 2009.

MEHTA, P. K. Durability of concrete exposed o marine environment. **ACI SP-109**, ACI Detroit, 1988, pp. 1-28.

MEHTA, P. K.; AİTCIN, C. Principles underlying production of High-Performance Concrete. **Cemente, Concrete and Agreggales**, 12 (1990), n. 2, pp. 70-78.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Edição 1, São Paulo, PINI, 1994.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo, PINI, 2014.

MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. In: **Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials**. Toronto, Canada, pp. 1-12, 1995.

MOKAREM, D. W., WEYERS, R. E., LANE, D. S. Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for supplemental cementitious material concrete mixtures. **Cement and Concrete Research**, 35 (2005), n. 5, pp. 918-925.

MOKAREM, D. W. Development of concrete shrinkage performance specifications. **Virginia Ploytechnic Istitute and State University**, 2002.

MONTE, R.; TOALDO, G. S.; FIGUEIREDO, A. D. Avaliação da tenacidade de concretos reforçados com fibras através de ensaios com sistema aberto. **Revista Matéria**, 19 (2014), n. 2, pp. 132-149.

NAAMAN, A. E. Development and evolution of tensile strength-hardening FRC composites. In: **7th International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications**, 2008, Chennai, India. **Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications**. Babneux - France: RILEM Publications S.A.R.L., 1 (2008), pp.1 – 28.

NAAMAN, A. E. Fiber reinforcement for concrete. **Concrete International**, 7 (1985), n. 3, pp. 21-25.

NEVILLE, A. M. BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto**. 2 Ed. Bookman, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed., São Paulo: Pini, 1997.

NOUSHINI, A.; SAMALI, B.; VESSALAS, K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 374–383, 2013.

NUNES, N. L.; AGOPYAN, V. A influência do fator de forma da fibra na tenacidade à flexão do concreto reforçado com fibras de aço. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, v. 225, n. 1, 1998.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. Retração do concreto de cimento portland. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, v. 452, n. 1, 2007.

ONUAGULUCHI, O.; BANTHIA, N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 1, pp. 1–48, 2016.

OSTERTAG, C. P.; BLUNT, J. Effect of crack control in hybrid fiber reinforced concrete composites on corrosion rate of steel reinforcing bars. **Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Assessment, Durability, Monitoring and Retrofitting of Concrete structures**, v. 5, n. 1, pp. 894–900, 2010.

PASSUELLO, A.; MORICONI, G.; SHAH, S. P. Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 10, pp. 699–704, 2009.

PEDROSO, F. L. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**. IBRACON, São Paulo, Jan – Mar, 2009.

PIASTA, W.; SIKORA, H. Effect of air entrainment on shrinkage of blended cements concretes. **Construction and Building Materials**, v. 99, pp. 298–307, 2015.

POTHAN L. A.; THOMAS, S. Polarity parameters and dynamic mechanical behaviour of chemically modified banana fiber reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**, 63 (2003), pp.1231-1240.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**: 2015. 243 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS), Porto Alegre, RS, Brasil.

QUININO, U. C. M. Concreto reforçado com fibras híbridas. **Treinamento: Estruturas e concreto-elementos pré-moldados**, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo – RS, jan. 2017.

RICHARDSON, A.; CONVENTRY, K.; LAMB, T.; MACKENZIE, D. The addition of synthetic fibres to concrete to improve impact/ballistic toughness. **Construction and Building Materials**, 121 (2016), nd., pp. 612-621.

ROJAS, C. M.; CINCOTTO, M. A. Influência da estrutura molecular dos policarboxilatos a hidratação do cimento Portland. **Ambiente Construído**, 13 (2013), n. 3, pp. 267-283.

SAITO, M.; KAWAMURA, M.; ARAKAWA, S. role of aggregate in the shrinkage of ordinary portland and expansive cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, 13 (1991), n 2, pp. 115-121.

SAITO, M.; KAWAMURA, M.; ARAKAWA, S. Role of aggregate in the shrinkage of ordinary portland and expansive cement concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 13, n. 2, pp. 115–121, 1991.

SANT, G.; FERRARIS, C. F.; WEISS, J. Rheological properties of cement pastes: A discussion of structure formation and mechanical property development. **Cement and Concrete Research**, 38 (2008), n. 11, pp. 1286–1296.

SANTIAGO, M. O. Aplicações do GRC-cimento reforçado com fibras de vidro em novos estádios de Sevilha, Espanha. In.: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

SANTOS, L.A. **Desenvolvimento de cimento de fosfato de cálcio reforçado por fibras para uso na área médico-odontológica**. 2002. 247 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

SARIGAPHUTI, M.; SHAH, S. P.; VINSON, K. D. Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete. **ACI Materials Journal**, (1993), pp. 309-318.

SAVASTANO Jr, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para construção de baixo custo**. Tese de livre docência. EPUSP. São Paulo. 2000.

SAVASTANO JR, H.; AGOPYAN, V. Concrete Composites Transition zone studies of vegetable fibre-cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, pp. 49–57, 1999.

SCHWARTZENTRUBER, A.; PHILIPPE, M.; MARCHESE, G. Effect of PVA, glass and metallic fibers, and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultrahigh strength mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 5, pp. 573–580, 2004.

SENISSE, J. A. D. L. **Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos**. 2010. 161 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

SENISSE, J. A. D. L. **Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna**: 2015. 297 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

SILVA, C. V. **Contribuição ao estudo do desgaste superficial por abrasão em concretos empregados em pisos**: 2011. 181 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, Brasil.

SILVA, E. F. Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração. **Igarss** **2014**, n. 1, pp. 1–5, 2007.

SOFI, A.; SWATHY, K.; SRIJA, G. Toughness study on fly ash based fiber reinforced concrete. **The international Journal of Advanced Structural Engineering**, 17 (2013), n. 5, pp. 1-4.

SOLTANI, A.; HARRIES, K. A.; SHAHROOZ, B. M. Crack Opening Behavior of Concrete Reinforced with High Strength Reinforcing Steel. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 4, pp. 253–264, 2013.

SORENSEN, C.; BERGE, E.; NIKOLAISEN, E. B. Investigation of Fiber Distribution in Concrete Batches Discharged from Ready-Mix Truck. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 8, n. 4, pp. 279–287, 2014.

SOROUSHIAN, P.; ELYAMANY, H.; TLILI, A.; OSTOWARI, K. Mixed-mode fracture properties of concrete reinforced with low volume fractions of steel and polypropylene fibers. **Cement and Concrete Composites**, 20 (1998), nd., pp. 67-78.

SOUZA, R. B. de. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. 2014. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil.

SULE, M.; BREUGEL, K. V. The effect of reinforcement on early-age cracking due to autogenous shrinkage and thermal effects. **Cement and Concrete Composites**, 26 (2004), n. 5, pp. 581-587.

SUN, W.; CHEN, H.; LUO, X.; QIAN, H. The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**, 31 (2001), pp. 595–601.

SUN, P.; WU, H. C. Transition from brittle to ductile behavior of fly ash using PVA fibers. **Cement and Concrete Composites**, 30 (2008), pp. 29-36.

TANESI, J.; AGOPYAN, V. Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil. **II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil**. EPSP. São Paulo, 1997.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. Fissuração por retração em concretos reforçados com fibras de polipropileno (CRFP). **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, v. 239, n. 1, 1999.

TASK Group Bond Models, fib Bulletin 10 – **Bond of Reinforcement in Concrete**, Lausanne, 2000.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of hydrating cement paste. **Cement and Concrete Research**, 25 (1995), n. 2, pp. 288 - 292.

TIGUMAN, M. P. **Estudo comparativo entre métodos de quantificação de tenacidade usando concretos reforçados com macrofibras de polipropileno**. 2004. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

TOLEDO FILHO, R. D.; SCRIVENER K.; ENGLAND G. L. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement and Concrete Composites**, (2000), n. 22, pp. 127-143.

TOUTANJI, H. et al. Properties of poly(vinyl alcohol) fiber reinforced high-performance organic aggregate cementitious material: Converting brittle to plastic. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 1, pp. 1–10, 2010.

TROXELL, G. E.; RAPHAEL, J. M.; DAVIS, R. E. Long-time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete. **American Society for Testing and Materials**, (1958), pp. 1101-1120.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**: 2007. 162 f. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFGRS), Porto Alegre, RS, Brasil.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 1, n. 1927, pp. 439–471, 2011.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho. **Concreto: Ciência e Tecnologia**, v. 2, n. 1990, 2011.

VASCONCELOS, A. C. Da invenção do conceito de tensão aos cabos de protensão com fibras artificiais. In: **IBRACON**, 36., 1994, Porto Alegre. Conferência Inaugural. Porto Alegre: PUCRS, 1994.

VAIRAGADE, V. S.; KENE, K.S. Experimental investigation on hybrid fiber reinforced concrete. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, n 2 (3), 2013, pp. 1037-1041.

XU, G.; MAGNANI, S.; HANNANT, D. J. Durability of hybrid polypropylene-glass fiber cement corrugated sheets. **Cement and Concrete Composites**, 20 (1998), pp. 79-84.

XU, B.; TOUTANJI, H. A.; GILBERT, J. Impact resistance of poly(vinyl alcohol) fiber reinforced high-performance organic aggregate cementitious material. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, pp. 347–351, 2010.

YANG, T. et al. Mechanical properties and extended creep behavior of bamboo fiber reinforced recycled poly (lactic acid) composites using the time – temperature superposition principle. **Construction and Building Materials**, v. 93, pp. 558–563, 2015.

YIN, S. et al. Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 101, pp. 1069–1077, 2015.

YOO, D. Y.; BANTHIA, N.; YOON, Y. S. Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 64, pp. 27–36, 2015.

YU, R. et al. Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. **Construction and Building Materials**, v. 107, pp. 203–215, 2016.

WITTMANN, F. H.; BELTZUNG, F.; ZHAO, T. J. Shrinkage mechanisms, crack formation and service life of reinforced concrete structures. **International Journal Structures Engineering**, 1 (2009), n. 1, pp. 13-28.

ZHANG, W.; ZAKARIA, M.; HAMA, Y. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, pp. 500–510, 2013.

ZHU, H.; LI, H. R.; ZHU, X. C. On concrete restrained eccentric ring and squared eccentric ring shrinkage test methods. **Construction and Building Materials**, v. 84, pp. 239–244, 2015.

ZOLLO, R.F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. **Cement and Concrete Composites**, 19 (1997), pp. 107-122.