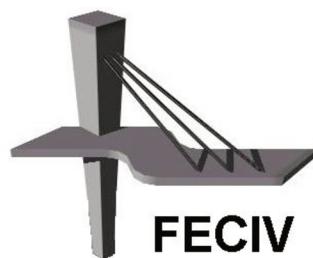




UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS MICROFIBRAS
DE POLIPROPILENO NO CONTROLE DA
RETRAÇÃO HIDRÁULICA NO CONCRETO
AUTOADENSÁVEL**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Lorena Silva

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS MICROFIBRAS DE
POLIPROPILENO NO CONTROLE DA RETRAÇÃO
HIDRÁULICA NO CONCRETO AUTOADENSÁVEL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

Coorientador: Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi

Uberlândia, 2018.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S586a
2018

Silva, Lorena, 1992-

Análise da influência das microfibras de polipropileno no controle
da retração hidráulica no concreto autoadensável [recurso eletrônico] /
Lorena Silva. - 2018.

Orientador: Antonio Carlos dos Santos.

Coorientador: Antônio de Paulo Peruzzi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1229>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia civil. 2. Concreto auto-compactável. 3. Fibras. 4.
Polipropileno. I. Santos, Antonio Carlos dos (Orient.). II. Peruzzi,
Antônio de Paulo (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU: 624

Maria Salete de Freitas Pinheiro - CRB6/1262



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1Y - Bairro Santa Mônica,
Uberlândia-MG, CEP 38400-902 Telefone: 343239-4137-
www.feciv.ufu.br/ppgec - posgradcivil@ufu.br



ATA

ATADA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 225/2018

CANDIDATO: Lorena Silva **Nº. Matrícula:** 11622ECV009

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos

TÍTULO: “Análise da influência das microfibras de polipropileno no controle da retração hidráulica no concreto autoadensável”.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Estruturas

PROJETO DE PESQUISA: Recuperação e reforço de elementos estruturais

DATA DA DEFESA: 05 de setembro de 2018

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 13h45min/17h00min

Reuniu-se na **Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa, bloco 1Y - Campus Santa Mônica** da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta pelos professores doutores: **Carlos Eduardo Marmorato Gomes – FEC/Unicamp; Andrielli Moraes de Oliveira – EECA/UFG e Antônio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU**, coorientador da discente e representante do orientador que encontra-se afastado. Ressalta-se que a **Prof.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira** participou da banca via webconferência desde a cidade de Goiânia/GO e os demais membros da banca e a aluna participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Prof. Dr. Antonio de Paulo Peruzzi**, apresentou a Comissão Examinadora e concedeu à discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata **aprovada**. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação

pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Membros titulares:

Prof. Dr. Antônio de Paulo Peruzzi – FECIV/UFU

Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes – FEC/Unicamp

Prof.^a Dr.^a Andrielli Moraes de Oliveira – EECA/UFG

Uberlândia, 23 de agosto de 2018.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Marmorato Gomes**, **Usuário Externo**, em 10/09/2018, às 16:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Andrielli Moraes de Oliveira**, **Usuário Externo**, em 11/09/2018, às 06:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio de Paulo Peruzzi**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 12/09/2018, às 09:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0701030** e o código **CRCF5A7A146**.

*À todos aqueles que chamo de Família;
dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus que me permitiu chegar até aqui e continua sempre me guiando pelos melhores caminhos.

Agradeço a agência de fomento CAPES pelo suporte financeiro necessário para que este trabalho se concretizasse.

As empresas NovaPlast e Maccaferri que doaram as fibras de polipropileno e a empresa MC-Bauchemie que disponibilizou o aditivo superplastificante utilizado.

Agradeço ao aluno de doutorado da UNICAMP, Jonatha Roberto que me recebeu em Campinas e me auxiliou em tudo que precisei, inclusive com a aquisição de materiais.

Agradeço a gentileza do Prof. Dr. Carlos Marmorato Gomes que disponibilizou o equipamento para execução do método.

Ao meu orientador e coorientador pela disposição e auxílio de sempre.

A minha família, que mesmo não sendo da área foram os que me deram a mão quando precisei. Incentivaram-me, me ajudaram e são quem fazem de mim a cada dia uma pessoa melhor. Minha mãe Cleunice, meu pai Carlos e minha irmã Lorraine.

Agradeço ao meu namorado e meu amor Josielson que me deu apoio e dedicou seu tempo, dia após dia, arduamente para que tudo desse certo.

A todos os meus amigos, de longa jornada ou que conheci no mestrado, cada um da sua maneira me incentivou e ajudou em cada dia de dificuldade ou nos momentos de descontração. Agradeço ao Felipe e Gustavo amigos de longa data. A Juliete, Marco Aurélio, e tantos outros que contribuíram da sua forma neste processo.

Aos técnicos, secretários e profissionais da UFU pela disposição, amizade e dedicação a este trabalho que às vezes não é valorizado corretamente. Especialmente ao secretário Rafael Monteiro, a Técnica Cristiane e ao Gercindo Ferreira.

Por fim, agradeço aos meus ajudantes que pegaram no pesado e tornaram meus dias mais leves na jornada de produção das inúmeras amostras.

Silva, L. Análise da influência das microfibras de polipropileno no controle da retração hidráulica no concreto autoadensável. 145 p. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2018.

RESUMO

Dentro da área de materiais e estruturas, o concreto autoadensável surgiu como um material que alia propriedades mecânicas já apresentadas pelo concreto convencional às características reológicas de fluidez e homogeneidade, propriedades necessárias durante a execução das estruturas de concreto. Apesar de inúmeras vantagens da utilização deste material, ainda há a existência de algumas manifestações ocasionadas pelo processo de retração. É o caso da fissuração resultante do processo de retração hidráulica. O objetivo desta pesquisa é avaliar a influência e consequências do processo de retração nas primeiras idades do concreto autoadensável, propondo a adição de microfibras de polipropileno para combater os efeitos da retração. Foram utilizadas proporções de 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% e microfibras de polipropileno de diferentes fatores de forma. Para avaliar as características resultantes desta adição foi escolhido o método de teste da norma ASTM C1579:2013. Após a execução dos ensaios e análise, os resultados mostraram que as fibras mais longas, com o volume de 0,20%, obtiveram maior eficiência, chegando a uma taxa de redução de área de fissuração de cerca de 99%. Também foi possível comprovar que um aumento no fator de forma reflete em um aumento na eficiência das fibras.

Palavras-chave: Concreto autoadensável - Fibras - Retração Hidráulica – Polipropileno – Compósito.

Silva, L. Analysis of the influence of polypropylene microfibers on the control of hydraulic shrinkage in self-compacting concrete. 145 pp. MSc dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2018.

ABSTRACT

Within the area of materials and structures, self-compacting concrete emerged as a material that combines mechanical properties already presented by conventional concrete to the rheological characteristics of fluidity and homogeneity, properties required during the execution of concrete structures. Despite many advantages of using this material, there are still some manifestations caused by shrinkage. This is the case of cracking resulting from the hydraulic shrinkage process. The objective of this research is to evaluate the influence and consequences of the retraction mechanism in the early ages of self-compacting concrete, proposing the addition of polypropylene microfibers to combat the effects of retraction. Proportions of 0.05%, 0.10%, 0.15% and 0.20% and polypropylene microfibers of different relation aspect. In order to evaluate the characteristics resulting from this addition, the test method of ASTM (2013) C1579 was chosen. After the tests and analysis, the results showed that the longer fibers, with a volume of 0.20%, obtained higher efficiency, reaching at a rate of reduction of the cracking area of about 99%. It has also been shown that an increase in the relation aspect reflects an increase in fiber efficiency.

Keywords: Self-compacting concrete - Fibers - Hydraulic Shrinkage - Composite - Polypropylene

SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

C-S-H	- Silicato de cálcio hidratado
Ca(OH) ₂	- Hidróxido de cálcio (portlandita)
CO ₂	- Dióxido de carbono (gás carbônico)
°C	- Graus Celsius
CaCO ₃	- Carbonato de Cálcio
Ca	- Cálcio
Na	- Sódio
K	- Potássio
a/c	- Relação água/cimento
%	- Porcentagem

ABREVIATURAS

m	- Metro
cm	- Centímetro
mm	- Milímetro
m ²	- Metro quadrado
mm ²	- Milímetro quadrado
µm	- Micrômetro
MPa	- Megapascal
GPa	- Gigapascal
g	- Grama
kg	- Quilograma
cm ³	- Centímetro Cúbico
m ³	- Metro Cúbico
s	- Segundo
h	- Hora
km	- Quilômetro
min	- Minuto

SIGLAS

CAA	- Concreto autoadensável
SCC	- Self-compacting concrete
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	- American Society for Testing Materials
AC	- Acceptance Criteria
UNESC	- Universidade do Extremo Sul Catarinense
EN	- European Standards
FRSCC	- Fiber-reinforced self-compacting concrete
CRF	- Concreto reforçado com fibras
CC	- Concreto convencional
LVDT	- Linear Variable Differential Transformers
CMOS	- Complementary metal-oxide semiconductor
IS	- Indian Standard
NBR	- Norma Brasileira
EFNARC	- European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete
TRF	- Taxa de redução de fissuração
MEV	- Microscopia eletrônica de varredura
DMAE	- Departamento Municipal de água e esgoto
UNE	- Una Norma Española
UNICAMP	- Universidade Estadual de Campinas
AMN	- Associação Mercosul de Normalização

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	15
INTRODUÇÃO	15
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	15
1.2 OBJETIVO GERAL.....	16
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4 JUSTIFICATIVA	17
1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
CAPÍTULO 2	19
RETRAÇÃO NO CONCRETO	19
2.1 CONCEITOS SOBRE RETRAÇÃO	19
2.1.1 Retração plástica	20
2.1.2 Retração por secagem.....	21
2.1.3 Retração por carbonatação	23
2.1.4 Retração autógena	24
2.1.5 Retração térmica.....	26
2.2 SURGIMENTO DE FISSURAS DEVIDO À RETRAÇÃO	26
2.3 MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAR O PROCESSO DE RETRAÇÃO	27
2.3.1 Ensaios com restrição à retração	32
2.3.2 Ensaios com retração livre	40
2.3.3 Ensaios com retração compensada	43
2.3.4 Conclusão	45
CAPÍTULO 3	46
CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE FIBRAS	46
3.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL	46
3.1.1 Características	47
3.1.2 Métodos de teste para avaliação das propriedades do concreto autoadensável fresco ...	49
3.1.3 Vantagens e desvantagens do CAA.....	51
3.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS	52
3.2.1 Tipos de fibra	55

3.2.2 Interface e interações entre matriz e fibra sintética	60
3.2.3 Uso de fibras para controle de fissuração no concreto	62
3.2.4 Cálculo do título das fibras.....	63
3.3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE FIBRAS	64
3.3.1 Fissuração e o concreto autoadensável.....	65
CAPÍTULO 4.....	67
PROGRAMA EXPERIMENTAL	67
4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	67
4.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	68
4.2.1 Agregado graúdo	68
4.2.2 Agregado miúdo: Areia Fina.....	69
4.2.3 Agregado miúdo: Pó de pedra.....	70
4.2.4 Cimento	70
4.2.5 Água	71
4.2.6 Aditivo.....	71
4.2.7 Fibras sintéticas	72
4.3 DOSAGEM DO CONCRETO	73
4.4 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO.....	74
4.5 METODOLOGIA DO ENSAIO EXPERIMENTAL	78
4.5.1 Método de ensaio ASTM C1579:2013.....	78
4.5.2 Caracterização do concreto quanto à resistência à compressão	81
4.5.3 Caracterização das fibras utilizadas quanto ao diâmetro.....	82
CAPÍTULO 5	83
APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	83
5.1 RESULTADOS PARA O CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES – FASE DE ENDURECIMENTO: MÉTODO DE ENSAIO ASTM C1579:2013.....	83
5.1.1 Caracterização das fibras utilizadas quanto ao fator de forma	83
5.1.2 Área de fissuração das amostras.....	84
5.1.3 Abertura de fissura	89
5.1.4 Taxa de redução de abertura de fissura	92

5.1.5 Resultados visuais das amostras em placa produzidas – Mapa de fissuração	93
5.2 RESULTADOS PARA O CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ANTES DA MOLDAGEM: MÉTODO DE ENSAIO ABNT NBR 15823-2: 2010.....	100
5.2.1 Análise do <i>slump flow</i> com a adição de fibras	100
5.3 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS	102
5.3.1 Resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto sem fibras	102
5.3.2 Análise microscópica das fibras dentro do compósito	102
CAPÍTULO 6.....	109
CONCLUSÃO.....	106
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICE A	115
APÊNDICE B.....	125
APÊNDICE C	128
ANEXO A	132
APÊNDICE D	133
APÊNDICE E.....	135
APÊNDICE F.....	137

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Retração plástica e a capacidade de deformação	21
Figura 2 – Modelo dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados	22
Figura 3 - Relação entre umidade relativa e perda de água.....	23
Figura 4 – Ocorrência da carbonatação no concreto	24
Figura 5 – O “eterno triângulo” da hidratação: calor, força e redução volumétrica da pasta de cimento hidratada	25
Figura 6 – Ensaio com retração em placa.....	32
Figura 7 – Amostras de teste para avaliar o potencial de fissuração.....	34
Figura 8 – Câmara de controle	35
Figura 9 – a) Painel com seções metálicas em formato de “U” para restrição interna e b) – Execução do ensaio	36
Figura 10 – Câmara climática	37
Figura 11 – Sistema do método de ensaio	38
Figura 12 – Sistema de teste com anel de aço	39
Figura 13 – Esquema da amostra	40
Figura 14 – Amostra conectada ao sistema de leitura de deslocamentos.....	40
Figura 15 – (a) Aparelho de medida de variação linear da amostra e (b) Experimento realizado tendo como base a norma IS 1199: 1959	41
Figura 16 – Amostras posicionadas para medição da retração.....	42
Figura 17 – Amostra sendo submetida ao teste	43
Figura 18 – a) Molde e instrumentação para avaliação da amostra, b) “cabeça” fixada com sistema de aplicação de forças e c) “cabeça” fixa	44
Figura 19 – Fluxograma de classes e subclasses de compósitos	53
Figura 20 – Tijolo adobe feito com mistura de terra crua, palha e fibras naturais	54
Figura 21 – Fibras atuando como ponte de transferência.....	55
Figura 22 – Diagrama de tensão por deformação elástica da matriz e fibras	56
Figura 23 – Fibra dentro do concreto. a) Microscopia e b) Imagem ampliada com câmera digital	62
Figura 24 – Curva granulométrica do agregado graúdo	69
Figura 25 – Curva granulométrica do agregado miúdo areia fina.....	69

Figura 26 – Curva granulométrica do agregado miúdo pó de pedra	70
Figura 27 – Fibras de polipropileno de a) 6 mm b) 12 mm c) 24 mm d) 10 mm.....	72
Figura 28 - a) Painel metálico utilizado como forma b) Peças para restrição.....	74
Figura 29 - Instrumentação do ensaio do método do cone de Abrams e execução do ensaio.	75
Figura 30 - a) Ensaio com valor dentro do recomendado b) Detalhe da borda do espalhamento	75
Figura 31 - Preparação das fibras para adição no concreto	76
Figura 32 - Fibras de polipropileno adicionadas de modo aleatório	76
Figura 33 - Detalhe da borda do espalhamento – Concreto com fibras	77
Figura 34 - a) Aplicação de produto para desforma na placa e b) Moldagem das amostras...	77
Figura 35 – Câmara de ensaio em a) Esquema em perfil e b) Câmara de controle.....	78
Figura 36 – Câmara de ensaio em a) Esquema em planta e b) Esquema em perfil	79
Figura 37 – a) Anemômetro e b) Termo-higrômetro.....	79
Figura 38 – Medida das fissuras geradas com a) Fissurômetro e b) Paquímetro digital	80
Figura 39 – a) Aplicação da carga de compressão b) Corpo de prova após ruptura	81
Figura 40 – Área de fissuração x Teor de fibra	88
Figura 41 – Taxa de redução de área de fissuração x Teor de fibra.....	89
Figura 42 – Média de abertura de fissura x Teor de fibra	91
Figura 43 – Gráfico que apresenta a média de abertura de fissura de acordo o volume de fibras	92
Figura 44 – Taxa de redução da abertura de fissura x Teor de fibra	93
Figura 45 – Edição de imagem para criar o mapa de fissuração	94
Figura 46 – Mapa de fissuração do concreto sem fibras	94
Figura 47 – Mapa de fissuração - fibras de 6 mm	95
Figura 48 – Mapa de fissuração do concreto com fibras de 12 mm.....	96
Figura 49 – Mapa de fissuração do concreto com fibras de 24 mm.....	98
Figura 50.....	
Figura 51 – Redução do espalhamento.....	101
Figura 52 – Média de <i>slump flow</i> x Teor de fibra	101
Figura 53 – Amostra com fibra de 10 mm com 0,10%	103
Figura 54 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,05%	103
Figura 55 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,05%	104
Figura 56 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,15%	104

Figura 57 - Amostra com fibra de 20 mm com 0,10%	104
Figura 58 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,10%	104
Figura 59 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,05%	105
Figura 60 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,20%	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ensaios experimentais que avaliam o processo de retração no concreto	29
Tabela 2 – Comparativo entre a norma ASTM C1579:2013 e AC 32:2003	33
Tabela 3 – Condições de teste desenvolvido por Paul Kraai (1985)	34
Tabela 4 – Faixa de valores típicos para cada método de teste	50
Tabela 5 – Classes e intervalos de valores para cada método de teste	50
Tabela 6 – Tipos de fibra e suas características.....	58
Tabela 7 – Número de amostras para cada cruzamento de variáveis	68
Tabela 8 – Características físicas do agregado graúdo	68
Tabela 9 – Características físicas do agregado miúdo areia fina.....	69
Tabela 10 – Características físicas do agregado miúdo pó de pedra	70
Tabela 11 – Cimento Portland	71
Tabela 12 – Aditivo superplasticificante	72
Tabela 13 – Propriedades das fibras de polipropileno.....	73
Tabela 14 – Consumo de materiais por m ³ de concreto produzido	73
Tabela 15 – Cálculo do fator de forma	84
Tabela 16 – Área de fissuração – concreto sem fibras	85
Tabela 17 – Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 6 mm.....	85
Tabela 18 - Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 12 mm	85
Tabela 19 - Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 24 mm	86
Tabela 20 - Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 10 mm	86
Tabela 21 – Média final da área de fissuração	86
Tabela 22 – Taxa de redução de área de fissuração.....	88
Tabela 23 – Média de abertura de fissura.....	90
Tabela 24 – Taxa de redução de abertura de fissura.....	92
Tabela 25 – Média de <i>slump flow</i>	100
Tabela 26 – Média de resistência à compressão para o concreto sem fibras.....	102

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto é um material de elevada versatilidade, facilidade de produção e de obtenção da matéria prima. Se suas propriedades forem investigadas e identificadas variáveis que alterem seu comportamento físico e mecânico e o torne susceptível ao surgimento de manifestações patológicas, isto o tornará um material ainda mais vantajoso. Um dos mecanismos que podem vir a causar danos futuros ao concreto é a retração.

Denomina-se retração a redução de volume que ocorre principalmente pela perda de água dos capilares do elemento de concreto ou por processos químicos inerentes ao material (SANCHES JÚNIOR, 1998; SOARES, 2015). No concreto armado, essas mudanças volumétricas da pasta são restrinidas pela presença do agregado, da armadura ou pela forma da peça estrutural. Devido à presença das restrições internas surgem tensões de tração no material. Como a retração no concreto inicia-se ainda na fase plástica e ganho de resistência, este não é capaz de suportar estas tensões e a consequência é o surgimento de fissuras que vão se abrindo ao longo do tempo de endurecimento e secagem.

O surgimento de fissuras deve ser evitado, pois, dependendo da abertura destas, podem vir a comprometer a durabilidade destes elementos, pois permitem a entrada de agentes externos como cloretos e gás carbônico acelerando reações deletérias. Estes fatores podem aumentar a taxa de permeabilidade e se o processo prosseguir pode vir a causar a redução da seção mecânica e com isto redução do cobrimento da armadura (BARLUENGA; HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2007; LOSER; LEEMANN, 2009; YADEGARAN *et al.*, 2007).

Pensando em realizar o controle da formação de fissuras surge a possibilidade da adição das fibras poliméricas. Este tipo de fibra é utilizado para reduzir a segregação e a retração ou para incrementar a resistência ao fogo (EFNARC, 2002). A utilização de fibras para reforçar o concreto permite aumentar a estabilização das tensões geradas durante a abertura de fissuras e a elasticidade do material (KAKOOEI *et al.*, 2012). As fibras têm a característica de atuar

como uma ponte de transferência das tensões superficiais geradas durante a cura do concreto, reduzindo o tamanho da abertura destas fissuras.

As fibras também podem ser utilizadas como reforço para aprimorar as propriedades físicas e mecânicas do concreto autoadensável da mesma forma em que são utilizadas no concreto convencional. O concreto autoadensável surgiu no final da década de 70 com o interesse em solucionar problemas de durabilidade que as estruturas apresentavam na época a partir do aprimoramento dos materiais utilizados. O início do desenvolvimento de um tipo de concreto que se mostrava capaz de fluir por todo o volume das formas de forma eficiente sem necessidade de adensamento.

Segundo Aslani e Nejadi (2013) o concreto autoadensável reforçado com fibras é conhecido como FRSCC, sigla para *Fiber-reinforced self-compacting concrete*. Este tipo de concreto é um material compósito relativamente recente que é capaz de combinar os benefícios do concreto autoadensável com a adição de fibras em matrizes frágeis de cimento. A utilização de fibras neste compósito é capaz de minimizar os efeitos de duas características do concreto opostas entre si: a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras (CRF) e a resistência à fissuração do concreto convencional (CC).

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da adição de microfibras de polipropileno no processo de retração hidráulica no concreto autoadensável.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência da adição de microfibras de polipropileno com diferentes fatores de forma e em diferentes teores de volume no comportamento do concreto autoadensável nas primeiras idades em relação à retração hidráulica;

- Avaliar a influência da adição das fibras no comportamento do concreto autoadensável no estado fresco quanto à sua trabalhabilidade.

1.4 JUSTIFICATIVA

A motivação deste trabalho pauta-se na busca por mecanismos que minimizem o processo de fissuração decorrente da retração hidráulica no concreto autoadensável. A formação de fissuras no concreto é uma das patologias que causa não só defeitos estéticos, provocando desconforto para os usuários, mas também comprometem a qualidade e durabilidade das estruturas de concreto (YADEGARAN *et al.*, 2007).

É de conhecimento que as estruturas de concreto sofrem degradação não apenas por falha humana durante o processo construtivo, mas também por processos ou mecanismos intrínsecos ao material (ROCHA, 2015). Segundo Piancastelli (2000), o concreto é um material não inerte, que está sujeito às alterações ao longo do tempo de vida útil do material, em função das interações entre os elementos que o constituem, entre eles e os agentes externos e entre os materiais que lhe são adicionados como aditivos. Ou seja, os próprios mecanismos que ocorrem durante a formação do concreto como o processo de retração são responsáveis por alguns tipos de manifestações patológicas como é o caso das fissuras.

Segundo Kakooei *et al.* (2012), o controle de fissuração do concreto é de grande importância para uma maior duração dos elementos ao longo do tempo. A justificativa é que as fissuras geradas aumentam a susceptibilidade do material à entrada de agentes externos que podem danificar a armadura. Desta forma, o desempenho, a necessidade de manutenção, durabilidade dos elementos e estética das estruturas de concreto também são reduzidas.

Ademais, segundo Turcry (2004) *apud* Girotto (2012), existem poucas informações a respeito do estudo da fissuração por retração hidráulica no concreto autoadensável. No estudo deste autor foram estudadas, mas de forma separada, a fissuração e a retração. Além disto, Figueiredo (2011) cita que a utilização do concreto reforçado com fibras no Brasil ainda é descrita como experimental em virtude das fibras serem dosadas com teores fixos, diante da total ausência de procedimentos que garantam a qualidade deste tipo de material e sem a presença de uma normatização nacional específica.

Também é importante deixar claro que o concreto autoadensável é um material já utilizado de forma comercial atualmente, mas que estudos específicos, especialmente em relação à adição de novos componentes, serão sempre vantajosos para incremento de suas propriedades.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é constituído por quatro capítulos, sendo estes descritos a seguir.

No *Capítulo 2* é possível encontrar a descrição do processo de retração do concreto, apresentando particularidades como os tipos de retração, características específicas destas, causas de ocorrência e consequências do processo. Além disto, tipos de ensaios normatizados ou desenvolvidos por diferentes pesquisadores para avaliar o processo de retração.

O *Capítulo 3* especifica as características, definições e trás um breve histórico referente ao concreto autoadensável. Elucida os pontos relevantes sobre concreto com fibras, com enfoque para sua definição de material compósito e as vantagens e propriedades influenciadas pela adição de diferentes tipos de fibras. Por fim, apresenta os pontos mais importantes e relevantes a cerca do concreto autoadensável reforçado com fibras.

No *Capítulo 4* é possível encontrar a apresentação dos materiais utilizados e metodologia do ensaio experimental definido.

O *Capítulo 5* trás a apresentação e análise dos resultados obtidos a partir de ensaios experimentais. Faz correlações, e ilustra com tabelas e gráficos os dados coletados.

Por fim, no *Capítulo 6* é possível encontrar a conclusão deste trabalho, apresentando todos os pontos observados, benefícios da utilização destes materiais e outros comentários relevantes. Além disto, trás algumas sugestões importantes para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

RETRAÇÃO NO CONCRETO

2.1 CONCEITOS SOBRE RETRAÇÃO

De acordo com Bastos (2001) os termos retração, variação dimensional e deformação se apresentam de várias formas na literatura. De forma geral, a *retração* é um fenômeno descrito como uma contração volumétrica do material. *Deformação* é a expressão da medida da variação dimensional relacionada a este fenômeno. Este último termo também pode ser utilizado para indicar uma variação de sentido contrário à retração, quando há a expansão volumétrica do material.

A retração total que ocorre no concreto é o resultado de uma soma de vários tipos de retração que, dependendo das circunstâncias, podem ocorrer simultaneamente ou serem independentesumas das outras. Além disto, é importante esclarecer que a retração é um mecanismo pelo qual ocorre a contração volumétrica do material, ou seja, ocorre nas três dimensões. Porém tornou-se usual medi-la de forma linear em grande parte dos métodos de ensaio em laboratório, porque na maioria dos elementos de concreto uma ou duas dimensões são muito menores que a outra e os efeitos da retração são muito maiores na maior dimensão. Além disto, pesquisas em sua maioria sugerem que as deformações ocorrem em cada dimensão de forma independente (ACI COMMITTEE 209, 2005; BASTOS, 2001).

Desta forma, segundo Bastos (2001) existem cinco diferentes tipos de retração que podem ocorrer no estado plástico do concreto ou no estado de endurecimento. De acordo com a natureza do fenômeno, elas se dividem em:

- Retração plástica;
- Retração por secagem;
- Retração por carbonatação;
- Retração autógena;
- Retração térmica.

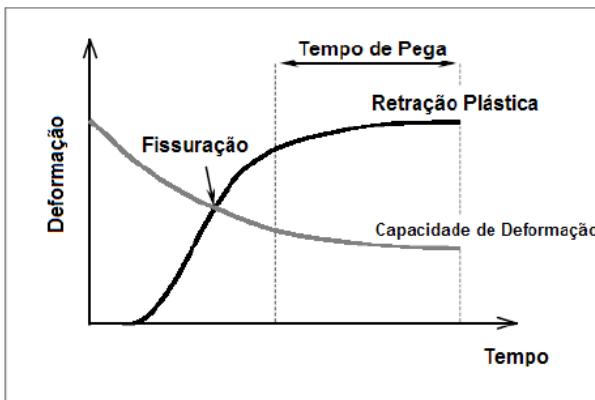
É importante salientar que existem algumas variações nas classificações para os tipos de retração existentes nas estruturas de concreto que variam de acordo com os autores em questão. Apesar disto, a classificação acima é válida para a maior parte dos estudos encontrados na literatura.

2.1.1 Retração plástica

Segundo Neville (2015) a movimentação de saída da água de um corpo poroso não completamente rígido provoca uma contração, esta contração é chamada de retração plástica. Esta ocorre quando a água é perdida pelo concreto estando ele ainda em estado plástico (fresco) por evaporação para a atmosfera ou perda por succão do concreto seco subjacente ou do solo (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A secagem rápida do concreto fresco causa retração plástica quando a taxa de perda de água da superfície excede a taxa disponível de água exsudada. A saída desta água cria uma pressão capilar negativa e provoca a contração do concreto, que uma vez restringido, provoca o surgimento de tensões de tração. Estas tensões também podem vir a surgir como consequência de uma diferença de variação volumétrica em diferentes pontos do material já que esta propriedade não é uniforme em todo o elemento (AÏTCIN; NEVILLE; ACKER, 1997; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NUNES; FIGUEIREDO, 2007; RODRIGUES; MONTARDO, 2002).

Segundo Tanesi (1999) *apud* Nunes e Figueiredo (2007, p. 5) e Mehta e Monteiro (2014) as fissuras por retração plástica podem ser mapeadas (distribuídas) ou alinhadas com a armadura. Também podem ocorrer nos locais onde há presença de mudanças de seção, diagonais ou formando um ângulo de 45° em relação à borda da laje ou pavimento. O espaçamento entre estas é em geral de 0,3 a 1,0 m e possuem profundidade de 25 a 50 mm.

A relação entre a retração plástica e a fissuração pode ser feita com o conceito de capacidade de deformação (Figura 1). Este conceito pode ser utilizado para definir a tensão máxima que o concreto no estado fresco é capaz de suportar. Um aumento da retração com o tempo implica em uma redução na capacidade de deformação (GIROTTTO, 2012).

Figura 1 – Retração plástica e a capacidade de deformação

Fonte: Girotto (2012).

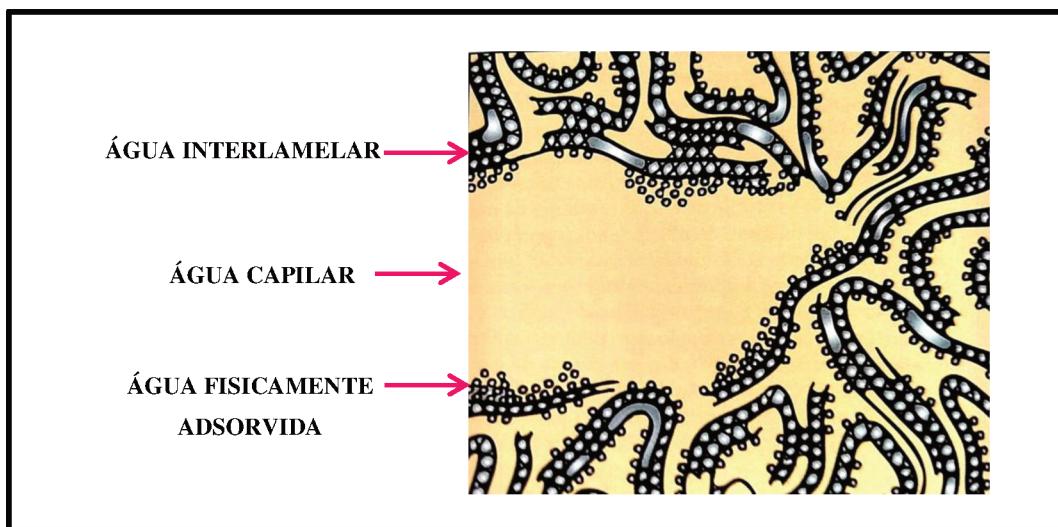
Por ser a perda de água por evaporação uma das principais causas da retração plástica este tipo de comportamento ocorre em elementos que possuem uma alta relação entre área superficial e espessura, pois, com uma área superficial maior a água terá mais facilidade de evaporar. Destacam-se os fatores que influenciam a taxa de evaporação: a umidade relativa, velocidade do vento que atua na superfície do concreto exposta e a temperatura ambiente (NEVILLE, 2015; NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Neville (2015) e Giovannetti (1989) argumentam que maiores taxas de cimento na mistura e uma maior relação água/cimento aumentam a deformação causada pela retração plástica.

2.1.2 Retração por secagem

Um dos tipos de retração mais comum e mais conhecido é a retração por secagem, mecanismo que se dá quando o concreto encontra-se exposto ao ar. A retração por secagem acontece após a retração plástica, ou seja, já na fase em que o concreto encontra-se endurecido. Segundo Nunes e Figueiredo (2007), esta retração verifica-se da mesma forma que a retração plástica, pela perda de água do material como consequência da troca de umidade com o ambiente. Por isto, este tipo de retração está ligado diretamente às propriedades da pasta de cimento, em relação à sua estrutura porosa e especialmente em relação ao tamanho dos poros. A retração por secagem pode crescer com um aumento da relação água/aglomerante, uma vez que esta condiciona a quantidade de água evaporável dentro da pasta e sua velocidade de deslocamento para a superfície do concreto. Além de estar ligada às propriedades do material, a retração por secagem pode ser influenciada por fatores externos como: baixa umidade, vento e altas temperaturas (NEVILLE, 2015).

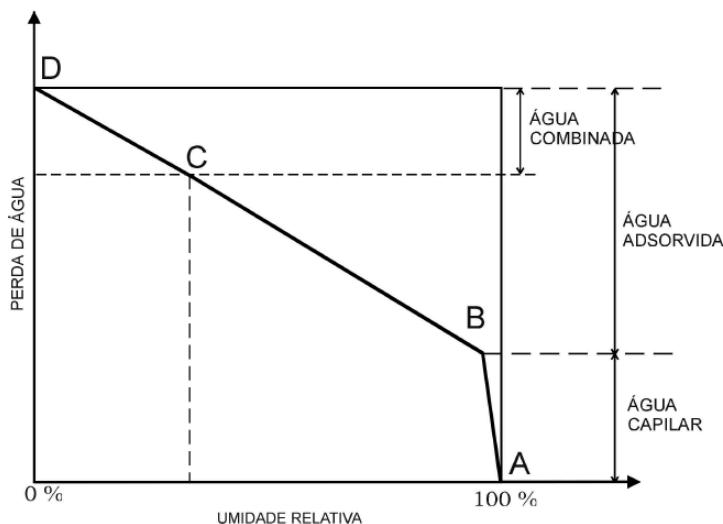
Ademais a retração por secagem ocorre em etapas de acordo com o tipo de água que está sendo eliminado. Trata-se de um processo contínuo em que cada etapa se dá em diferentes níveis de associação da água. Segundo Mehta e Monteiro (2014), esta divisão em diferentes classificações é baseada no grau de dificuldade ou facilidade em que a água é retirada. Pode-se dividi-las então em: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada (Figura 2).

Figura 2 – Modelo dos tipos de água associados aos silicatos de cálcio hidratados



Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014).

Assim, segundo Nunes e Figueiredo (2007) quando o material se encontra com uma umidade relativa abaixo de 100% é iniciado o processo de perda de água. A primeira perda que ocorre é a água dos vazios capilares ou chamada de água capilar. Com a continuidade do decréscimo da taxa de umidade ocorre o processo de perda da água adsorvida fisicamente aos cristais de C-S-H. Caso a umidade relativa do material continue reduzindo a um valor abaixo de 11% pode ocorrer a perda da água interlamelar. Este processo pode ser visualizado na Figura 3.

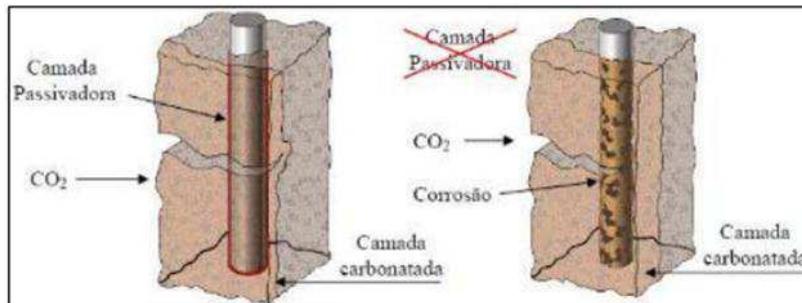
Figura 3 - Relação entre umidade relativa e perda de água

Fonte: Nunes e Figueiredo (2007).

Ainda segundo os autores, a microdeformação no concreto devido à retração por secagem é da ordem de 0,4 a 1,0 mm/m. Estes valores podem parecer pequenos, mas por influenciarem as características do concreto são valores considerados relevantes e não podem ser ignorados em projetos estruturais. Por estarem ligadas ao processo de evaporação da água tanto a retração plástica quanto a retração por secagem podem ser consideradas como um processo de retração hidráulica.

2.1.3 Retração por carbonatação

A carbonatação é uma alteração que ocorre dentro do concreto causada por reações químicas. Esta reação ocorre quando o gás carbônico atmosférico (CO_2) permeia e começa a reagir com os álcalis do concreto (hidróxido de Ca, Na ou K e C-S-H), formando assim carbonato de cálcio (CaCO_3). Este fenômeno físico-químico (Figura 4) causa uma queda no pH do concreto, baixando seu valor para abaixo de 9, reduzindo a alcalinidade e causando a despassivação do aço. Esta despassivação significa a retirada da camada protetora de óxidos e hidróxidos das barras de aço (HOUST, 1993).

Figura 4 – Ocorrência da carbonatação no concreto

Fonte: Gonçalves (2015).

A retração por carbonatação é explicada através de diferentes teorias, Tavares (2008) e Neville (2015) explicam que a retração pode ser causada pela dissolução de cristais especialmente de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que estão sob tensão devido à retração por secagem, seguida pela deposição do CaCO_3 . Coelho (2002) *apud* Dellinghausen (2009, p. 37) cita que outra teoria que pode explicar a retração por carbonatação é em virtude da liberação da água, que é considerada como não evaporável, durante a reação de carbonatação. Enquanto Houst (1993) comenta que pode ocorrer a retração por carbonatação após o estágio de desidratação do C-S-H. Segundo Tavares (2008), esta sequência de secagem e ocorrência da carbonatação afetam significativamente o valor total da retração. Ainda segundo o autor, carbonatação e secagem simultâneas produzem retração menor do que quando a secagem é seguida pela carbonatação. A ocorrência destes eventos de forma simultânea também é citada por Swenson e Sereda (1968) *apud* Dellinghausen (2009, p. 37) que sugere que a carbonatação pode causar a despolimerização e desidratação do C-S-H.

Segundo El-Khoury (2010) este tipo de retração ocorre geralmente na superfície dos elementos de concreto, mas caso já existam fissuras anteriores o processo pode ocorrer na parte interna do mesmo. Outra característica da retração por carbonatação segundo Nunes e Figueiredo (2007) é a sua irreversibilidade. Atribui-se isto a mudanças nas características adesivas do C-S-H.

2.1.4 Retração autógena

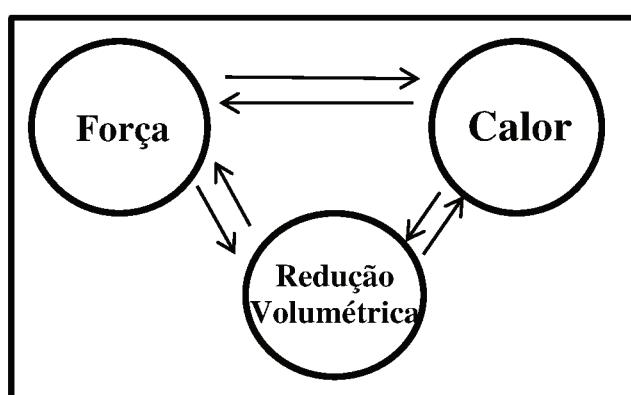
A deformação causada pela retração no concreto endurecido também ocorre como consequência da hidratação contínua do cimento. Este tipo de retração ocorre dentro da argamassa do concreto mesmo sem contato com o meio externo (sem perda de água para o

ambiente externo). Por isto é comumente chamada de retração autógena ou ainda retração por autodessecção (e menos comum retração química). A palavra “autógena” significa todo e qualquer material que possui a mesma composição de origem ou que gera a si próprio. Desta forma a retração autógena recebe este nome, pois é um processo sem influências externas e que ocorre a partir de um processo interno do material, devido às reações de hidratação que ocorrem na matriz de cimento (ACI COMMITTEE 209, 2008; NUNES; FIGUEIREDO, 2007). Por isto é interessante salientar que o ensaio para avaliar o processo de retração autógena ocorre com as amostras seladas, isoladas do meio externo.

Ainda segundo Nunes e Figueiredo (2007) este tipo de retração ocorre quando a água livre migra dos poros para participar das reações de hidratação do cimento formando produtos cujo volume é menor que o volume dos reagentes, ou ainda porque a água foi adsorver-se na superfície dos hidratos formados (C-S-H).

O termo hidratação do cimento é uma forma simplificada de fazer referência às reações químicas do cimento com a água. Essa reação resulta na formação de uma pasta de cimento hidratada sólida, coesa e adesiva, o elemento essencial da resistência do concreto. Para que ocorram essas reações há geração de calor no sistema e uma redução de volume da pasta de cimento hidratada que gera a formação de forças internas. A relação entre variáveis pode ser expressa pela Figura 5, que visa representar que os três eventos que estão interligados. O calor e a redução volumétrica são características negativas para o sistema, no entanto estas duas variáveis são toleráveis na medida em que os profissionais da área aprendam a gerenciar seus efeitos nas estruturas de concreto (AİTCIN; NEVILLE; ACKER, 1997).

Figura 5 – O “eterno triângulo” da hidratação: calor, força e redução volumétrica da pasta de cimento hidratada



Fonte: Traduzido e adaptado de Aïtcin, Neville e Acker (1997).

2.1.5 Retração térmica

Segundo Mehta e Monteiro (2014) de forma geral, sólidos expandem com o calor e se retraem com o esfriamento. A não ser sob condições extremas de temperatura, as estruturas comuns de concreto sofrem pouco ou nenhum dano com as alterações de temperatura ambiente, mas em estruturas de grande porte, uma combinação do calor produzido na hidratação do cimento e condições relativamente baixas de dissipação resulta em uma grande elevação da temperatura do concreto e subsequente o resfriamento até a temperatura ambiente, o que pode fazer com que o concreto fissure.

2.2 SURGIMENTO DE FISSURAS DEVIDO À RETRAÇÃO

Como o concreto é um material frágil e com baixa capacidade resistente a esforços de tração podem vir a surgir fissuras quando está submetido às deformações. Isto ocorre, pois as deformações causadas pela retração são restrinvidas e tensões de tração surgem no concreto. O resultado deste processo é o surgimento de fissuras que começarão a aparecer logo que o esforço de tração exceda a resistência à tração. De acordo com Nguyen *et al.* (2015), uma vez ocorridas, as fissuras existentes irão se desenvolver e continuar aumentando sua abertura ao passo que mais energia continuar sendo fornecida, ou seja, caso aja continuidade do processo que origina os esforços internos seja ele a perda de água, mudanças de temperatura ou reações de hidratação. Outro caso que pode ocorrer são fissuras nas primeiras idades do concreto, que ao longo do tempo, com efeitos posteriores como a aplicação de cargas externas, vão se desenvolvendo e aumentando.

O surgimento de fissuras pode comprometer seriamente a integridade física e mecânica, causar defeitos estéticos na superfície e influenciar na durabilidade de uma estrutura. As fissuras se tornam aberturas que permitem a entrada de agentes externos como cloretos e gás carbônico acelerando reações deletérias (BARLUENGA; HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2007; LOSER; LEEMANN, 2009; NGUYEN, *et al.*, 2015; YADEGARAN *et al.*, 2007).

Para combater a formação de fissuras a técnica mais efetiva é impedir a perda de água pela superfície do concreto estendendo seu período de cura. Em algumas situações, entretanto, somente a cura não é suficiente, tornando assim necessária a prática de algumas medidas adicionais como: umedecer sub-base e fôrmas; umedecer agregados quando estiverem secos e absorventes; reduzir o tempo entre o lançamento e o início da cura e a utilização de fibras

sintéticas de baixo módulo adicionadas à mistura (BANTHIA; GUPTA, 2006; MEHTA; MONTEIRO, 2014; YADEGARAN *et al.*, 2007).

Cabe observar que nem todas as fissuras são prejudiciais. Segundo Oliveira (2015), foi desenvolvido e já está em uso um compósito cimentício de alta ductilidade, também chamado de SHCC (*strain hardening cement-based composites*) esse material a base de cimento, agregado miúdo e uma alta taxa de fibras curtas dispersas (em torno de 2%), pode ser utilizado para aplicação em diversas atuações como para reparos em pavimentos e pontes de concretos, lajes de continuidade de pontes, reparos em barragens e muros de contenção. Neste tipo de compósito há uma grande capacidade de deformação em tração (em torno de 3%), dada pela atuação das fibras que mantêm a matriz unida mesma após a ocorrência da primeira fissura. As fissuras que surgem em sequência na matriz tem sua abertura em geral abaixo de 100 µm pela presença das fibras, que mantêm a capacidade do material, num processo chamado múltipla fissuração. Também há a ocorrência da regeneração (*self healing*) mais eficaz em fissuras de até 50 µm de abertura. Quando ocorrem ciclos de molhagem e secagem, a presença da água e do gás carbônico reage com os aglomerantes hidráulicos expostos na abertura das fissuras. Esta hidratação tardia gera cristais que unem as paredes das fissuras, expandindo e preenchendo o vazio existente (STEIN, 2012; PERRONE, *et al.* 2012).

2.3 MÉTODOS DE ENSAIO PARA AVALIAR O PROCESSO DE RETRAÇÃO

Conhecido os tipos de retração que ocorrem no concreto é relevante que seja feita a apresentação dos principais ensaios experimentais presentes na literatura que possuem o objetivo de avaliar a retração. De acordo com Nunes (2006), também existem modelos teóricos que auxiliam na previsão do processo de retração como: Modelo ACI 209; Modelo do CEB-FIP Model Code 90; Modelo da ABNT NBR 6118:2003 e o modelo de Gardner e Lockman. Contudo estes não serão discutidos neste trabalho.

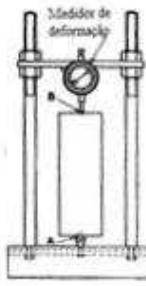
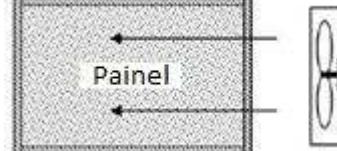
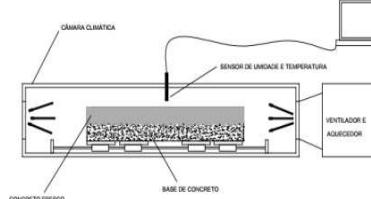
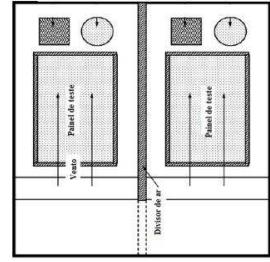
De acordo com Nunes e Figueiredo (2007) a priori é possível separar estes métodos experimentais em: ensaio em placa, anel e linear (prismático) referindo-se ao formato em que as amostras são produzidas e ensaiadas. Os métodos de ensaio também podem ser divididos em: passivos e ativos. Métodos passivos são aqueles em que se avaliam as variações volumétricas da amostra sem imposição de ações externas (desconsiderando o efeito de fluência). Já nos testes ativos, que têm sido estudados à cerca de 20 anos, a cada deformação

medida é imposta uma força externa com o objetivo de que a amostra recue para a sua posição inicial, considerando o efeito de fluência (MELO NETO *et al.*, 2008).

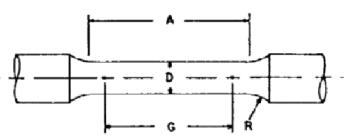
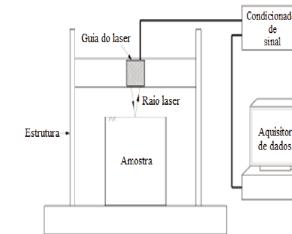
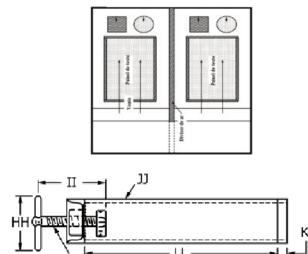
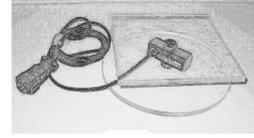
Outra classificação também utilizada é a definição de métodos que permitem a retração livre e métodos que avaliam a retração com restrição. O primeiro possui um dos lados do molde livre e assim há a liberdade para o material se movimentar sem restrição. No segundo tipo há a utilização de artifício físico criando uma barreira que impeça ou dificulte a movimentação do material durante seu processo de retração.

Os principais métodos de ensaios encontrados na literatura são apresentados em forma de Tabela 1 ordenados de acordo com o ano de publicação.

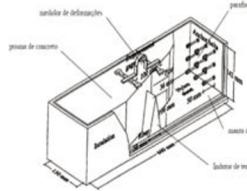
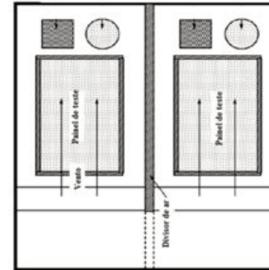
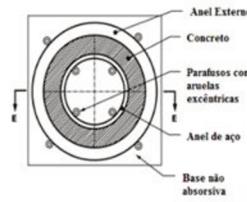
Tabela 1 – Ensaios experimentais que avaliam o processo de retração no concreto

Método de Ensaio (Referência ou autor(es))	IS 1199	Paul Kraai	Banthia, Yan e Mindess	AC 32
Configuração experimental				
Geometria do corpo de prova	Prismático	Prismático (Placa)	Prismático (Placa)	Prismático (Placa)
Dimensões do corpo de prova	75 mm x 75 mm x 150 a 300 mm	610 mm x 920 mm x 19,05 mm	1010 mm x 100 mm	356 mm x 559 mm
Ano de publicação	1959	1985	1995	2003
Presença de restrição à retração	Não	Sim	Sim	Sim
Tipo do método	Passivo	Passivo	Passivo	Passivo

Continuação da Tabela 1 – Ensaios experimentais que avaliam o processo de retração no concreto

Método de Ensaio (Referência ou autor(es))	Veiga e Souza	Qi, Weiss e Olek	Barluenga e Hernández-Olivares	Teste TR 2D
Configuração Experimental				
Geometria do corpo de prova	Provete	Prismático	Prismático	Prismático (Placa)
Dimensões do corpo de prova	Não há dados	506 mm x 280 mm x 152 mm	900 mm x 600 mm x 50 mm (Placa) 400 mm x 100 mm x 100 mm (Prisma)	101,6 mm x 101,6 mm x 12,7 mm
Ano de publicação	2004	2005	2007	2008
Presença de restrição à retração	Não	Não	Sim (Placa) / Não (Prisma)	Sim
Tipo do método	Passivo	Passivo	Passivo	Passivo

Continuação da Tabela 1 – Ensaios experimentais que avaliam o processo de retração no concreto

Método de Ensaio (Referência ou autor(es))	Melo Neto <i>et al.</i>	Mora-Ruacho, Gettu e Aguado	Pelisser <i>et al.</i>	ASTM C1579	ASTM C157	ASTM C1581
Configuração Experimental						
Geometria do corpo de prova	Prismático	Prismático	Prismático (Placa)	Prismático (Placa)	Prismático	Circular
Dimensões do corpo de prova	50 x 50 x 1000 mm	150 x 150 x 600 mm	910 mm x 610 mm x 20 mm	355 mm x 560 mm	75 mm x 75 mm x 330 mm	Ø int. 405 mm, altura: 150 mm
Ano de publicação	2008	2009	2010	2013	2014	2016
Presença de restrição à retração	Retração compensada	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Tipo do método	Ativo	Passivo	Passivo	Passivo	Passivo	Passivo

Fonte: Autor, 2018.

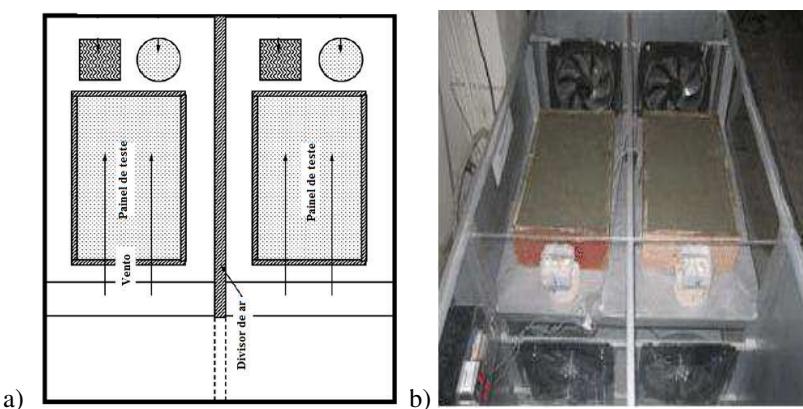
Classificados os métodos, no item subsequente será apresentada a metodologia de cada de forma sucinta.

2.3.1. Ensaios com restrição à retração

2.3.1.1 Ensaio normativo ASTM C1579:2013

Este ensaio normatizado refere-se à fabricação de placas que são submetidas ao processo de avaliação da fissuração causada pela retração plástica. Estas placas são colocadas dentro de uma câmara de controle por um período de 24 horas, fase em que o concreto encontra-se no estado fresco. O objetivo da câmara é controlar propriedades ambientais como temperatura, umidade relativa, taxa de evaporação e velocidade de vento atuante e impedir que estas variáveis influenciem na avaliação deste ensaio. A norma ASTM C1579:2013 é intitulada como “Avaliação da fissuração causada por retração plástica em concreto reforçado com fibras (utilizando formas de aço inseridas)” e estabelece padrões para execução do ensaio (Figura 6).

Figura 6 – Ensaio com retração em placa



Fonte: a) Traduzido e adaptado de ASTM C1579:2013 e b) Rahmani *et al.* (2012).

O objetivo é realizar comparação entre a fissuração superficial formada inicialmente um painel de controle e um segundo painel produzido com diferente tipo de concreto. Este segundo é especialmente fabricado com concreto que possua a adição de fibras. As formas em que é moldado o concreto possuem três pontos de indução de tensão. Além disto, o teste supracitado possui como função avaliar os efeitos da evaporação, assentamento, retração plástica e retração autógena.

2.3.1.2 Ensaio AC 32:2003

O critério do método descrito em AC 32: 2003 estabelece no item 4.5 critérios para avaliação da fissuração causada pela retração plástica. Esta norma propõe um método de teste com características bem parecidas com o teste da ASTM C1579:2013, como mesmos aparelhos e forma de execução. Diante disto, ressaltam-se apenas diferenças de valores adotados e outros pontos relevantes na tabela comparativa apresentada como Tabela 2. O método de teste do critério AC 32:2003 é apresentado no mesmo como Anexo A.

Tabela 2 – Comparativo entre a norma ASTM C1579:2013 e AC 32:2003

Propriedades	ASTM C1579:2013	AC 32:2003
Taxa de evaporação	1,0 kg/m ² . h	0,975 kg/m ² . h
Área de evaporação	1,0 m ²	0,0929 m ²
Balança	3 kg	2,2 kg
Agregados	19 mm	19 mm
Molde (área)	0,1988 m ²	0,1600 m ²
Molde (altura)	160 mm	102 mm
Restrição interna	32 mm (2) / 63,5 mm	31,7 mm (2) / 63,5 mm
Velocidade do vento	16,92 km/h	16,10 km/h
Nº de amostras	2	6
Vibração	Até nivelar	12 s
Superfície	Sem recomendações	Magnésio + água
Intervalo	30 min	30 min
Unid. de medida	mm	mm ²
Mínimo CRR	Não recomenda	40%

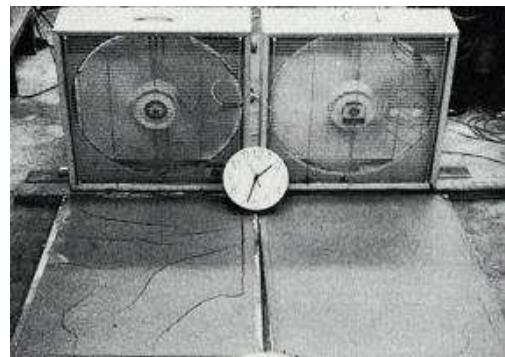
Fonte: Autor, 2017.

2.3.1.3 Ensaio desenvolvido por Paul Kraai (1985)

O teste também se trata de um teste com a fabricação de placas de concreto que possuem com restrição à retração. Os fatores que contribuem para a formação de fissuras por retração segundo Kraai (1985) são: materiais e dosagem; técnicas de execução; temperatura e umidade; práticas de cura e condições do piso no caso de lajes posicionadas em cima do mesmo. É importante observar que o autor ressalta que o principal objetivo deste teste é avaliar o

potencial de fissuração. Duas amostras são moldadas e posicionadas em frente à ventiladores para início do teste, como ilustra a Figura 7.

Figura 7 – Amostras de teste para avaliar o potencial de fissuração



Fonte: Kraai (1985).

É interessante observar que para fabricação das amostras há a adição de um alto teor de cimento e uma alta relação água/cimento. As condições e recomendações necessárias para desenvolvimento do teste são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de teste desenvolvido por Paul Kraai (1985)

Condições Aplicadas	Características
Amostra de pequena espessura e alta área superficial	610 x 920 x 19,05 mm
Sem agregados	Taxa de cimento/agregado 1:4 (retirado após mistura)
Alto teor de consumo de cimento	418 kg/m ³
Alta taxa de água/cimento	a/c = 0,7
Movimento da água livre apenas para cima	A parte debaixo é coberta com filme plástico
Ausência de restrição da superfície de base	Por causa da presença do plástico
Restrição perimetral	Faixa de 12,7 mm x 25,4 mm em formato “L”
Exposição ao vento	16,1 km/h a 19,3 km/h

Fonte: Autor (2018).

As condições do ambiente, embora influenciem nas propriedades dos painéis, não necessitam serem pré-definidas desde que sejam as mesmas para os dois painéis que estão sendo ensaiados. Segundo o autor o início da fissuração costuma ocorrer por volta de 1 hora após o

início. A avaliação final dos painéis ocorre 24 horas após o início do ensaio. São avaliadas as fissuras superficiais formadas em abertura e comprimento, resultantes do processo de retração.

2.3.1.4 Ensaio Pelisser *et al.* (2010)

Baseado no teste de Kraai (1985), pesquisadores da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) desenvolveram uma adaptação na qual também eram utilizados painéis para avaliação da fissuração, mas desta vez dentro de uma câmara de controle, como mostra a Figura 8. Neste teste foram propostas amostras de dimensões 910 x 610 x 20 mm, em que também não se utilizava agregados graúdos e possuíam o mesmo sistema de restrição perimetral.

Figura 8 – Câmara de controle



Fonte: Pelisser *et al.* (2010).

O concreto era produzido, moldado e nivelado e logo depois a amostra era colocada dentro da câmara de controle. A câmara utilizada possui formato de “U” para criar um sistema de circulação de ar e a medida das condições climáticas era feita a 10 cm acima da superfície das amostras a cada 1 hora, durante 9 horas de ensaio. Como a avaliação era feita nas primeiras idades do concreto o principal objetivo era avaliar a retração plástica e formação de fissuras.

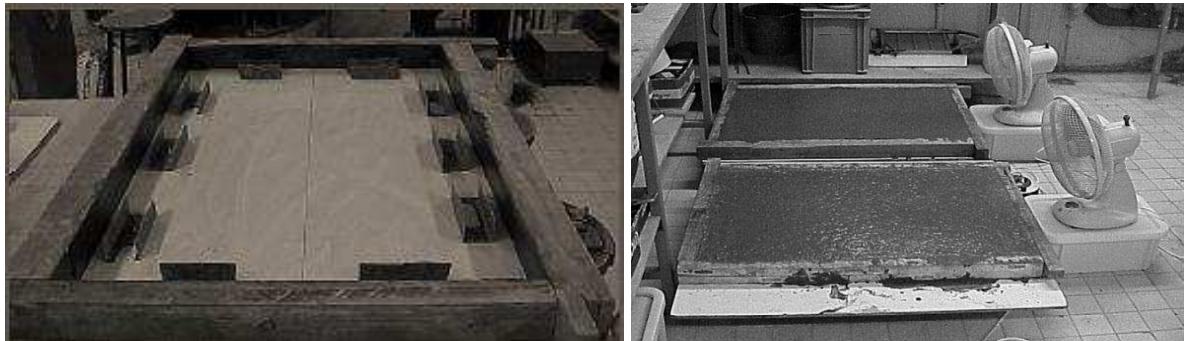
2.3.1.5 Método de Barluenga e Hernández-Olivares (2007)

O ensaio dos pesquisadores Barluenga e Hernández-Olivares (2007) pode ser dividido em duas partes. A primeira se refere ao mesmo tipo de teste executado por Kraai (1985) apresentado anteriormente, testes em placa que avaliam a influência de aspectos físicos como temperatura e vento na retração na formação de fissuras. Já a segunda parte é um teste do tipo

prismático (linear) no qual é avaliada a variação de comprimento longitudinal do corpo de prova com o auxílio de um LVDT (transdutor para medição de deslocamento linear).

Sendo o primeiro teste baseado no método Kraai (1985) o objetivo deste é o mesmo desenvolvido por este pesquisador, avaliar as consequências do movimento de retração do concreto e a formação de fissuras superficiais. A única diferença considerável é a restrição imposta. Enquanto Kraai (1985) executa seu ensaio com amostras restritas com o auxílio de seções em forma de “L” anexadas ao perímetro, Barluenga e Hernández-Olivares (2007) propuseram a restrição interna a partir do posicionamento perimetral de seções metálicas internas ao corpo de prova e em formato de “U” como mostra a Figura 9. Apesar desta diferença, os outros procedimentos do teste são bastante similares. A execução do ensaio com duas unidades de amostras ocorre de forma simultânea, como também ilustra a Figura 9.

Figura 9 – a) Painel com seções metálicas em formato de “U” para restrição interna e b) – Execução do ensaio



Fonte: Barluenga e Hernández-Olivares (2007).

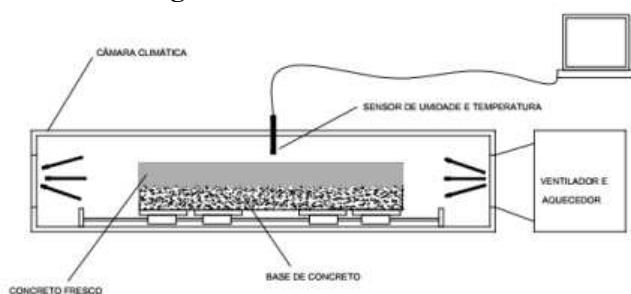
Depois de 24 horas as amostras eram desmoldadas e armazenadas sob condições controladas. Os resultados de fissuração eram avaliados com a divisão em oito partes para execução de um mapeamento. As fissuras eram medidas em tamanho e abertura após 7 dias de execução da cura. Desta forma os pesquisadores obtinham como resposta a área de fissuração em mm^2/m^2 de amostra e o máximo comprimento de fissura era encontrado. O objetivo deste ensaio era avaliar a fissuração provocada pelo processo de retração plástica do concreto.

2.3.1.6 Ensaio de Banthia, Yan e Mindess (1996)

Este teste também é realizado com amostras em formato de placa. Este método apresenta como restrição um substrato base fabricado com concreto que possui 40 mm de espessura e

uma área de 1010 x 100 mm. A função deste é aumentar a área superficial, com um aumento da rugosidade da superfície utilizando agregados com 20 mm e permitindo que metade da dimensão dos grãos permaneça exposta. O conjunto fôrma-substrato-cobertura é colocado em uma câmara de controle, na qual um aquecedor e um ventilador proporcionam um ambiente como ilustrado na Figura 10. Duas horas e meia após a colocação do conjunto na câmara climática, os corpos-de-prova são desmoldados e o monitoramento da fissuração acompanhado.

Figura 10 – Câmara climática

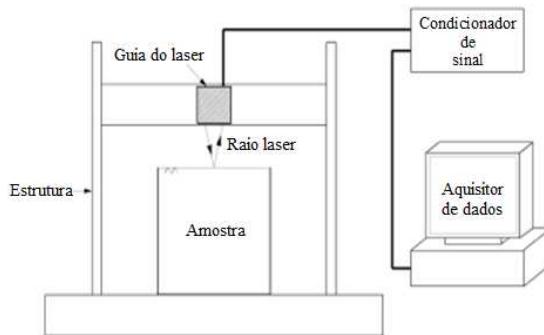


Fonte: Banthia, Yan e Mindess (1996).

Depois disto é feita a medição do comprimento e abertura de fissuras através de um fissurômetro. Como resultado é obtida uma curva de área de fissura x tempo para cada tipo de concreto a ser estudado.

2.3.1.7 Ensaio de Qi, Weiss e Olek (2005)

Já o ensaio realizado pelos pesquisadores Qi, Weiss e Olek (2005) foi baseado num método diferente para avaliar a retração que ocorre no concreto durante o processo de endurecimento. Estes autores partiram da ideia da utilização de um sistema de emissão de laser. Este sistema, ilustrado na Figura 11, funciona da seguinte forma. Uma amostra é posicionada sobre uma mesa móvel e, ao longo do tempo, é interceptada por um dispositivo de medição a laser.

Figura 11 – Sistema do método de ensaio

Fonte: Traduzido e adaptado de Kwak, Hyo-Gyoung e Soojun (2008).

A medição a laser consiste em uma fonte de laser que emite um feixe em direção à superfície fresca do concreto sendo que parte deste feixe é refletida de volta em direção ao sensor. Assim que o feixe intercepta a fonte, ativa uma parte do CMOS (*complementary metal-oxide-semiconductor*) ou em português semicondutor de metal-óxido complementar. O comprimento da trajetória do feixe de laser muda quando a distância entre a fonte e a superfície do concreto varia, ou seja, quando o mesmo sofre uma variação volumétrica. Deste modo ativa uma diferente porção do sensor e ao longo do tempo são identificadas as deformações decorrentes da retração do material. O objetivo deste ensaio era avaliar a deformação no dispositivo provocada pelo processo de retração no concreto.

2.3.1.8 Ensaio normativo ASTM C1581:2009

Já dentro do ensaio em formato circular, a norma ASTM C1581:2009 apresenta um método de teste padrão para determinação da idade de fissuração e tensão de tração induzida para avaliar as características da argamassa e do concreto com restrição à retração. Desenvolvido com uma amostra em formato circular moldada em volta de um anel de aço.

O objetivo é avaliar os efeitos das proporções da mistura e das propriedades do material do concreto na fissuração, devido a alguns fatores como: retração na secagem, deformações causadas por retração autógena e calor de hidratação. Nele uma amostra de concreto fresco é compactada ao redor de um molde circular em forma de um anel central feito de aço, como pode ser visto na Figura 12. A tensão de compressão desenvolvida no anel causada pela retração do concreto é mensurada ao longo do tempo após a moldagem. Desta forma, a idade

em que ocorre a fissuração e a taxa de tensão de tração desenvolvida na amostra de teste são indicadores da resistência do material à fissuração sob restrição.

Figura 12 – Sistema de teste com anel de aço

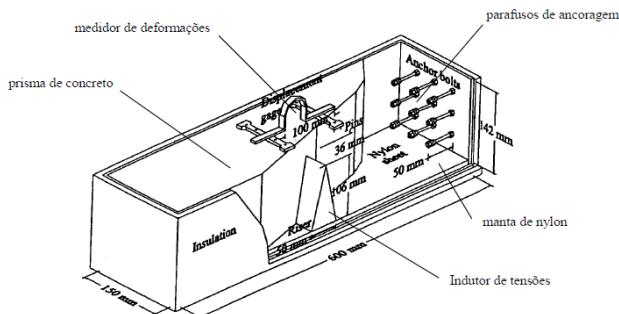


Fonte: ASTM C1581:2009.

Esta tendência à fissuração depende de variáveis como: tipo de estrutura, grau de retração, taxa de desenvolvimento própria, métodos construtivos e de cura e condições do meio ambiente. Depois de obtidos, os resultados dos ensaios são plotados em uma curva de esforço registrado no anel versus a idade das amostras. Além disso, de acordo com a norma, outros tipos de dados de saída (variáveis para análise da amostra) podem ser obtidos entre eles: idade de fissuração e sua média, esforço inicial, idade média do esforço inicial, esforço máximo e sua média, taxa de tensão, tempo decorrido e tensão líquida.

2.3.1.10 Ensaio Mora-Ruacho, Gettu e Aguado (2009)

Outro tipo de ensaio que se diferenciou dos demais é este desenvolvido por Mora-Ruacho, Gettu e Aguado (2009). Caracterizado pela utilização de um prisma de dimensões 150 x 150 x 600 mm, no qual é introduzido um indutor de tensões no centro e parafusos para ancoragem nas extremidades (Figura 13). Ao longo do processo o concreto sofre deformações que são medidas por um dispositivo em forma de ferradura até o ponto no qual ocorre a fissuração. O objetivo deste ensaio era avaliar a deformação no dispositivo provocada pelo processo de retração plástica do concreto.

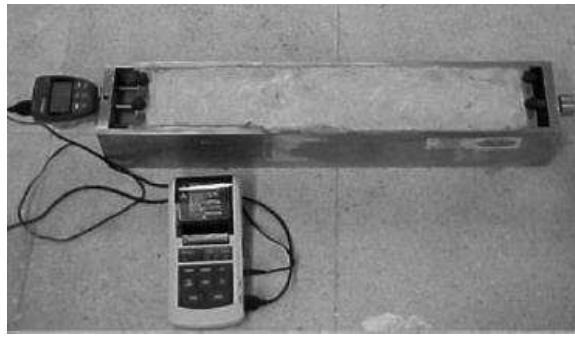
Figura 13 – Esquema da amostra

Fonte: Mora-Ruacho, Gettu e Aguado (2009).

2.3.2 Ensaios com retração livre

2.3.2.1 Ensaio de Barluenga e Hernández-Olivares (2007)

A segunda parte do teste de Barluenga e Hernández-Olivares (2007) foi formulada para avaliar a retração sem restrição interna (retração livre) com o auxílio de uma aparelhagem de medida de deslocamento linear (LVDT) conectado a um sistema de aquisição de dados, como ilustrado na Figura 14. Eram feitas duas amostras, mas agora estas possuíam forma prismática sendo as dimensões de 500 x 100 x 50 mm. Além disso, dois entalhes eram instalados nas extremidades da amostra, sendo de um lado fixo e do outro livre para permitir a movimentação do elemento.

Figura 14 – Amostra conectada ao sistema de leitura de deslocamentos

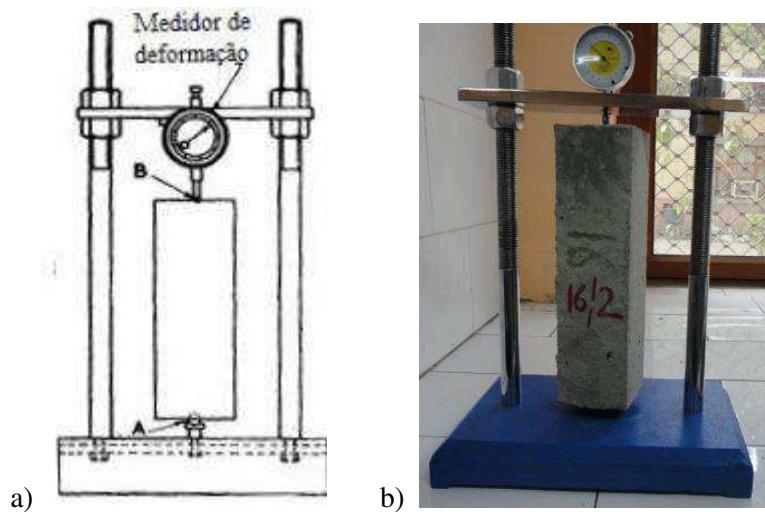
Fonte: Barluenga e Hernández-Olivares (2007).

Depois de moldada a amostra e posicionados instrumentos eram realizadas leituras sucessivas de deslocamento a cada 30 minutos, dentro de 24 horas. Em frente à amostra era posicionado um ventilador para gerar um vento de 3 m/s durante as 6 primeiras horas de execução do teste. O objetivo deste ensaio era avaliar a deformação linear provocada pelo processo de retração plástica do concreto.

2.3.2.2 Ensaio IS 1199 (1959)

Um dos primeiros ensaios de retração livre registrado é este ensaio da norma indiana (*Indian Standard*) número 1199 que se refere a métodos de amostragem e análise do concreto. No item 10 desta norma sobre “Determinação da mudança no comprimento, em função da secagem e molhagem (retração inicial, retração por secagem, mudanças de umidade)” há dois tipos de métodos de teste especificados cujo objetivo é avaliar a retração de amostras prismáticas de concreto. Entre os dois tipos de método, todo o procedimento de produção e processamento do concreto é o mesmo, o que altera entre os dois é a aparelhagem utilizada para medir as deformações longitudinais. As Figuras 15a e 15b ilustram a execução do teste.

Figura 15 – (a) Aparelho de medida de variação linear da amostra e (b) Experimento realizado tendo como base a norma IS 1199: 1959



Fonte: a) IS 1199: 1959 e b) Kumar, Goel e Mathur (2013).

A forma de produção das amostras era o seguinte. Eram moldadas e após 24 horas colocadas imersas em água até 28 dias após a moldagem. Durante a execução do teste a amostra é retirada da cura sob imersão e imediatamente medido o seu comprimento. Depois colocada no forno durante 44 horas e retirada e resfriada por no mínimo 4 horas em um dessecador contendo cloreto de cálcio sólido em uma solução saturada. Depois disto medida novamente.

Este ciclo deve se repetir até que a diferença entre duas leituras seja menor que 0,01 mm. O resultado do processo será a diferença entre a medida inicial e a final de secagem, expressa em porcentagem e chamada de comprimento de secagem.

2.3.2.3 Ensaio Veiga e Souza (2004)

Este ensaio com retração livre em amostras lineares foi desenvolvido por Veiga e Souza (2004) da Universidade Federal Fluminense (UFF) em parceria com o Laboratório de Nacional de Engenharia Civil de Lisboa, Portugal. O teste é constituído por uma amostra moldada na forma de um provete, como é chamada, e posicionada sob instrumentação em que uma parte da amostra é fixa (parte superior) e a outra é livre para movimentação. Esta parte livre é conectada a um medidor para que ao longo do ensaio com a movimentação do concreto possam ser lidas as respectivas leituras de deformação. Este esquema está ilustrado na Figura 16.

Figura 16 – Amostras posicionadas para medição da retração



Fonte: Veiga e Souza (2004).

2.3.2.4 Ensaio normativo ASTM C157:2014

Anteriormente foram apresentados os ensaios normatizados pela ASTM em placa, anel e o terceiro método é o ensaio com amostras lineares. O ensaio normatizado ASTM C157:2014, que define “Método de teste padrão para avaliar as mudanças no comprimento de argamassa de cimento hidráulico ou concreto” é um teste similar ao desenvolvido pela norma indiana IS 1199:1959, em que é medida a deformação de uma barra prismática ao longo do tempo, posicionada em uma aparelhagem com um instrumento de medida, no caso da ASTM C157:2014 com o uso de um relógio comparador ou mesmo um LVDT, como ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Amostra sendo submetida ao teste



Fonte: Global Lab (2017). Disponível em: <http://www.globallab.co.in/index.php/home/services/49>. Acesso em 07 abr. 2017.

O objetivo principal deste teste, segundo a norma, é avaliar a mudança de volume (seja de contração ou expansão) causada por alterações de temperatura e umidade do ambiente e também comparar diferentes composições de concreto e suas respectivas deformações ao longo do tempo.

Depois de fabricadas e moldadas, as amostras devem ser mantidas dentro de uma sala de controle com condições mantidas por 24 horas. Depois colocadas dentro de uma solução de cal e água e levá-los imediatamente para aferir a primeira leitura com o relógio comparador. Realizada a primeira leitura, deve-se voltar a amostra para a solução mantendo a temperatura de 23°C por 28 dias. Depois dos 28 dias, realizar a medida novamente.

Com as amostras já medidas deverão ser armazenadas em sala de controle para realizar medidas com 4, 7, 14 e 28 dias. Como as medidas são realizadas já com o concreto endurecido e sem o isolamento do meio externo o principal objetivo deste teste é avaliar o processo de retração por secagem, assim como o método anterior.

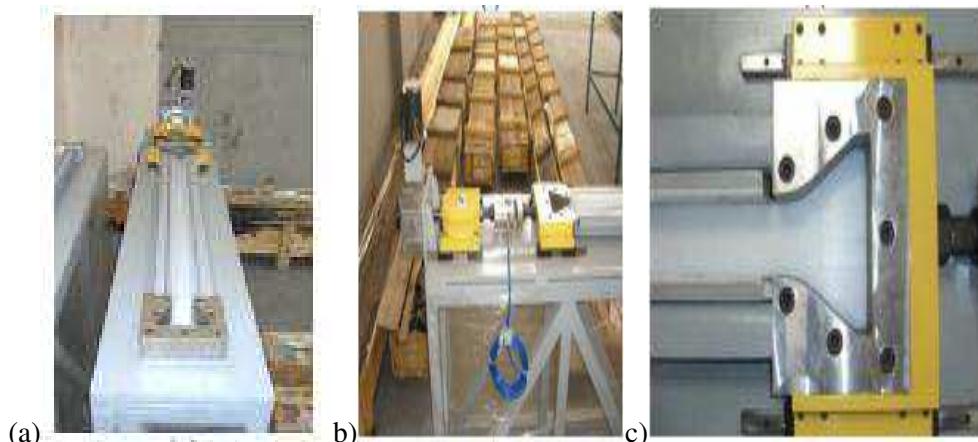
2.3.3 Ensaios com retração compensada

2.3.3.1 Ensaio Melo Neto *et al.* (2008)

Este tipo de ensaio trabalha com o mesmo tipo de corpo de prova utilizado por Veiga e Souza (2004), uma amostra moldada no mesmo formato e analisada dentro de um equipamento especial. A diferença entre o método de ensaio de Veiga e Souza (2004) e Melo Neto *et al.* (2008) é que no sistema de retração compensada uma das extremidades do corpo-de-prova é fixada à mesa de aço (Figura 18c) e outra engastada ao sistema cíclico de compensação

automatizado, sistema mostrado na Figura 18a. Este sistema é basicamente constituído de um motor de passo, caixa de redução e fuso de esferas (Figura 18b), com precisão e força suficientes para realizar deslocamento da extremidade móvel de acordo com o desejado para o ensaio. Para a mensuração das deformações lineares do corpo-de-prova foram empregados LVDTs de alta precisão ($0,64 \mu\text{m}$). No sistema de compensação cíclica também foi adicionada uma célula de carga para a medida da tensão acumulada para tracionar ou comprimir o corpo-de-prova.

Figura 18 – a) Molde e instrumentação para avaliação da amostra, b) “cabeça” fixada com sistema de aplicação de forças e c) “cabeça” fixa



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

Como princípio básico do sistema, qualquer deformação que ocorra na amostra deve ser “zerada” ou reduzida ao menor valor possível e, simultaneamente, mensurada a tensão gerada necessária para retornar a amostra para a sua posição original (BENTUR; KOVLER, 2003; MELO NETO *et al.*, 2008).

Os autores explicam que a principal vantagem deste tipo de equipamento com retração com compensação cíclica é a garantia da restrição total sem depender da rigidez do equipamento para garantir a restrição. O que não ocorre nos métodos tradicionais, como no método de ensaio da ASTM C1581:2009 - Método do anel de aço - pois a rigidez do aço do anel é diferente da rigidez do concreto e esta diferença atrapalha a medição das tensões e deformações desenvolvidas.

2.3.4 Conclusão

Dentre todos estes tipos de métodos de ensaio, pode-se observar que os três testes normatizados pela ASTM, sendo estes: ASTM C1579:2013; ASTM C1581:2009 e ASTM C157:2014 são os mais utilizados como base de referência pelos pesquisadores. No qual cada um deles representa o padrão de um tipo de amostra, em placa, anel e linear.

O único tipo de amostra que foge deste padrão são as lineares no formato de provete. Diversos autores vêm estudando e aprofundando conhecimentos neste tipo de teste. Já que é um teste que também apresenta bons resultados para análise de retração a partir da deformação do material.

Neste trabalho foi escolhido o método de teste da ASTM C1579:2013, pois o mesmo mostra-se como um método bastante eficiente para avaliar o principal efeito da retração hidráulica nas primeiras idades do concreto e a formação de fissuras superficiais, além de apresentar instrumentação e condições de teste viáveis para implantação. Visto que por gentileza do Prof. Dr. Carlos Marmorato Gomes foi disponibilizado o equipamento indicado pela norma para execução do método. Cabe ressaltar que para este trabalho foram feitas algumas modificações quanto à execução do ensaio em razão da utilização do concreto autoadensável, material com propriedades diferentes do concreto convencional. Além disto, tornar o mecanismo de restrição à movimentação e da evaporação da água mais críticos. Este processo de modificação será apresentado adiante.

CAPÍTULO 3

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE FIBRAS

3.1 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O concreto autoadensável (CAA) ou em inglês *self-compacting concrete (SCC)* pode ser definido como concreto que possui habilidade de fluir apenas com o auxílio de seu próprio peso sem a necessidade de nenhum tipo de vibração. Um material que deve possuir homogeneidade necessária para que não ocorra nenhum tipo de segregação significativa (ABNT NBR 15823-1, 2010; BARLUENGA; HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2007; EFNARC, 2002; GRDIC *et al.*, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; YADEGARAN *et al.*, 2007).

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008) uma das características fundamentais do CAA é sua trabalhabilidade, uma medida para avaliar a facilidade pela qual o concreto fresco pode ser colocado e compactado. É uma combinação entre fluidez, coesão, transportabilidade, compactação e viscosidade. Esta trabalhabilidade pode ser avaliada pelas seguintes propriedades: **habilidade passante, habilidade de preenchimento (fluidez) e resistência à segregação**. Uma mistura de concreto só pode ser considerada CAA caso apresente estas três características.

A habilidade passante do CAA pode ser descrita como a capacidade da mistura se manter coesa o suficiente para que escoe intacta entre as barras de aço, sem obstrução de fluxo ou segregação, mesmo com a presença de uma alta taxa de armadura. Habilidade de preenchimento ou fluidez é a capacidade do concreto autoadensável fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços. E sua resistência à segregação remete à capacidade de se manter coeso ao fluir, passando ou não por obstáculos, ou seja, de manter sua composição homogênea (ABNT NBR 15823-1, 2010; EFNARC, 2002; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Além destas características a ABNT NBR 15823-1:2010 estabelece outra propriedade intrínseca ao CAA que deve ser analisada, a viscosidade plástica aparente. Propriedade esta que está relacionada à consistência (coesão) da mistura e que influencia na resistência do concreto ao escoamento. Ou seja, quanto maior a viscosidade do concreto maior sua resistência ao escoamento.

3.1.1 Características

Para manter estas propriedades os materiais utilizados na produção são os mesmos do concreto convencional além de alguns componentes como: aditivo superplasticificante, plastificante ou modificador de viscosidade; aumento da quantidade de finos da mistura, que pode ser feito pelo aumento no volume de pasta ou também com o acréscimo de adições minerais (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; YADEGARAN *et al.*, 2007).

Estas modificações nos componentes do concreto estão associadas ao aumento da taxa de fluência e retração e podem ser relacionadas também à redução do módulo de elasticidade (YADEGARAN *et al.*, 2007). Contudo, segundo Dal Molin (2008), a ideia de que o módulo de elasticidade era reduzido e a estrutura mais deformável em função do alto teor de argamassa não é mais válida. Estudos recentes indicam que, depois de endurecido, o concreto autoadensável trabalha exatamente como o concreto convencional em relação ao módulo.

Segundo Girotto (2012), os aditivos superplasticificantes atuam no concreto dispersando as partículas de cimento, as quais apresentam tendência em flocular quando entram em contato com a água de amassamento. Por isto, de acordo com Barluenga e Hernández-Olivares (2007), o aditivo superplasticificante age como um redutor de água da mistura para que as propriedades que caracterizam o concreto endurecido sejam resguardadas, pois com o excesso de água na composição, fatores prejudiciais podem vir a surgir. Os aditivos mais recomendados são os de 3^a geração, superplasticificantes a base de policarboxilatos, pois permite uma maior redução de água, maiores resistências iniciais e maior fluidez por tempo prolongado (GIROTTTO, 2012).

Ainda segundo Girotto (2012), além disto, há a necessidade de uma alta taxa de material fino com o objetivo de aumentar a viscosidade e coesão por consequência aumentar a resistência à segregação dos agregados. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), essa alta quantidade de

finos oferece uma melhora das propriedades tanto no estado fresco quanto no endurecido. Ela atua como ponto de nucleação (quebram a inércia do sistema), fazendo com que as partículas de cimento reajam mais rapidamente com a água. O resultado é aumento do ganho de resistência nas primeiras idades, assim como aumento da compacidade da pasta dificultando a ação de agentes agressivos melhorando a zona de transição. Desta forma, resistência à segregação aliada à fluidez evita que ocorram macro defeitos, bolhas de ar, falhas de concretagem, que reduzem o desempenho mecânico do concreto e a durabilidade da estrutura.

O CAA é tão versátil quanto o concreto convencional, pois pode ser feito *in loco* ou dosado em centrais de concreto e depois transportado por meio de caminhões-betoneira. Também pode ser lançado com o auxílio de caminhões-bomba, gruas ou simplesmente espalhado (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Registros indicam que o desenvolvimento do concreto autoadensável com pesquisas no Japão no final da década de 70 do interesse em solucionar problemas de durabilidade que as estruturas apresentavam na época. A solução encontrada para resolver os problemas de durabilidade do concreto sem depender da qualificação da mão de obra, que não apresentava qualificação suficiente, era explorar o aprimoramento dos materiais utilizados. Foi assim o início do desenvolvimento do concreto autoadensável que se mostrava capaz de fluir por todo o volume das formas de forma eficiente sem necessidade de adensamento (DOMONE, 2006; LIU, 2010; MEHTA; MONTEIRO, 2014; NUNES, 2001; OKAMURA; OUCHI, 1999; NUNES, 2001).

Segundo EFNARC (2002) depois do seu desenvolvimento no Japão, graças ao surgimento dos aditivos superplastificantes, o CAA começou a ser utilizado com grande abrangência em toda a Europa tanto para a fabricação de concreto moldado *in loco* quanto para a produção de elementos pré-moldados.

Apesar deste grande crescimento, o concreto autoadensável é um material ainda em conhecimento e que tem suas propriedades dependentes das características dos materiais empregados e das proporções na composição, por isso existem vários estudos e métodos e ainda não há um consenso quanto ao melhor ou mais adequado método de concepção da composição.

3.1.2 Métodos de teste para avaliação das propriedades do concreto autoadensável fresco

Segundo EFNARC (2002) e Barluenga e Hernández-Olivares (2007) muitos métodos de teste têm sido propostos para mensurar as propriedades do CAA, como sua habilidade passante, habilidade de preenchimento, resistência à segregação e viscosidade plástica aparente. Os métodos de teste mais utilizados são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Métodos de ensaio e propriedades a serem avaliadas

Número	Método	Propriedade
1	<i>Slump-Flow</i> (Método do cone de Abrams)	Habilidade de preenchimento
2	<i>Orimet</i>	
3	Funil "V"	
4	<i>Slump-Flow T₅₀₀</i>	Habilidade de preenchimento e viscosidade plástica aparente
5	Anel "J"	Habilidade passante
6	Caixa "L"	
7	Caixa "U"	
8	Caixa de preenchimento	Resistência à segregação
9	Teste de estabilidade Tela GTM	
10	Funil "V" T _{5min}	

Fonte: Adaptado de EFNARC (2002) e ABNT NBR 15823-1:2010.

Na Tabela 4 são apresentados intervalos de valores aceitáveis para cada método de teste de acordo com a EFNARC (2002) e na Tabela 5 os intervalos e classes definidos pela ABNT NBR 15823-1:2010.

Tabela 4 – Faixa de valores típicos para cada método de teste

Número	Método	Unidade	Faixa de valores típica	
			Mínimo	Máximo
1	<i>Slump-Flow</i> (Método do cone de Abrams)	mm	650	800
2	<i>Slump-Flow T₅₀₀</i>	s	2	5
3	Funil "V"	s	6	12
4	<i>Orimet</i>	s	0	5
5	Anel "J"	mm	0	10
6	Caixa "L"	h_2/h_1	0,8	1
7	Caixa "U"	(h_2/h_1) mm	0	30
8	Caixa de preenchimento	%	90	100
9	Teste de estabilidade Tela GTM	%	0	15
10	Funil "V" T _{5min}	s	0	3

Fonte: Adaptado de EFNARC (2002).

Tabela 5 – Classes e intervalos de valores para cada método de teste

Propriedade a ser avaliada	Fluxo	Classe	Variável	Intervalo	Método de ensaio
<i>Slump-flow</i> (espalhamento)	Livre	SF1	Espalhamento (mm)	550 a 650	ABNT NBR 15823-2
		SF2		660 a 750	
		SF3		760 a 850	
Viscosidade plástica aparente	Livre	VS1	T500 (s)	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
		VS2		> 2	
Habilidade passante	Livre	PJ1	Anel J (mm)	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3
		PJ2		25 a 50 com 16 barras de aço	
Habilidade passante	Confinado	PL1	Caixa L (H2/H1)	≥ 0,80, com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4
		PL2		≥ 0,80, com três barras de aço	
Viscosidade plástica aparente	Confinado	VF1	Funil V (s)	< 9	ABNT NBR 15823-5
		VF2		9 a 25	
Resistência à segregação	Confinado	SR1	Coluna de segregação (%)	≤ 20	ABNT NBR 15823-6
		SR2		≤ 15	

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15823-1:2010.

A separação em classes desta é feita para indicar a qual tipo de aplicação é destinado cada tipo de concreto autoadensável. As indicações são apresentadas em detalhes no Anexo A da norma.

Segundo Elaty e Ghazy (2017), *slump flow test* ou teste de fluxo de queda é um método de teste primário, muito utilizado entre pesquisadores e na prática de execução, pois permite avaliar a habilidade de preenchimento (fluidez) adequada para seu uso. De acordo com a ABNT NBR 15823-2:2010 este método de teste também é conhecido por método do cone de Abrams, no qual é possível avaliar a fluidez do CAA pelo espalhamento em fluxo livre do concreto e, além disto, também permite observar se está havendo segregação no contorno. A variação do teste (variante T₅₀₀) calcula o tempo que o concreto atinge uma marca de 500 mm de diâmetro (2 a 5 segundos).

3.1.3 Vantagens e desvantagens do CAA

O concreto autoadensável pode ser definido como um desenvolvimento da construção envolvendo elementos de concreto nas últimas décadas em virtude dos benefícios em relação a alguns fatores que envolvem um sistema estrutural. Segundo Barluenga e Hernández-Olivares (2007), EFNARC (2002) e Tutikian e Dal Molin (2008) entre as vantagens existentes pode-se citar:

- redução do tempo de construção com um lançamento mais rápido (espalhamento e nivelamento do concreto) e sem necessidade de adensamento;
- redução da mão de obra;
- mais segurança em função da diminuição do número de trabalhadores;
- melhor acabamento final da superfície;
- maior liberdade de *design* (liberdade de formas e dimensões), pois o CAA preenche formas curvas, esbeltas, com altas taxas de armadura e de difícil acesso;
- redução de danos ambientais com a redução de ruídos;
- seções de concreto mais esbeltas;
- aumento da compacidade tornando o concreto menos permeável e mais durável;
- permite obter um ganho ecológico porque utilizam em sua composição altos teores de resíduos industriais como cinza volante, escória alto forno ou cinza de casca de arroz.

Há de se observar, em especial, as consequências geradas pela vibração durante o adensamento. Além de ser ponto de interferência e poluição sonora especialmente em grandes centros urbanos ou obras perto de escolas e hospitais, há prejuízo à saúde dos trabalhadores. Segundo Lopes (2017), estudos indicam que a utilização de equipamentos de vibração pode causar uma série de desordens físicas como: perda do equilíbrio, falta de concentração, entre outras.

Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), de forma geral há um aumento do custo na fabricação do CAA em relação ao concreto convencional, mas este é capaz de ser compensado pelas vantagens do mesmo como no caso de obras de maior porte.

Algumas dificuldades ou desvantagens também podem ser mencionadas. Em virtude das características deste tipo de concreto estarem ligadas à sua composição, há a necessidade de uma mistura especial diferente do concreto convencional, de modo que o mesmo tenha a trabalhabilidade adequada, não apresente exsudação ou segregação do material e que sua composição também não afete negativamente as propriedades do concreto endurecido. Quanto ao transporte do concreto autoadensável a maior dificuldade é a questão dos superplastificantes. Eles não podem ser misturados na central de dosagem, mas apenas alguns instantes antes do lançamento porque têm um período de vida mais curto, principalmente em climas mais quentes. Cuidados também devem ser tomados nas partes das estruturas com desníveis, como degraus de escada, vigas que dividem peças de diferentes níveis e lajes com grandes contra flechas. Para estes locais é necessária a execução de barreiras que impeçam o concreto de se nivelar ou o uso de concreto convencional. Devemos lembrar que o CAA é fluido como a água, então ele tende a se nivelar. Na prática esses pequenos problemas podem ser resolvidos com ajustes (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

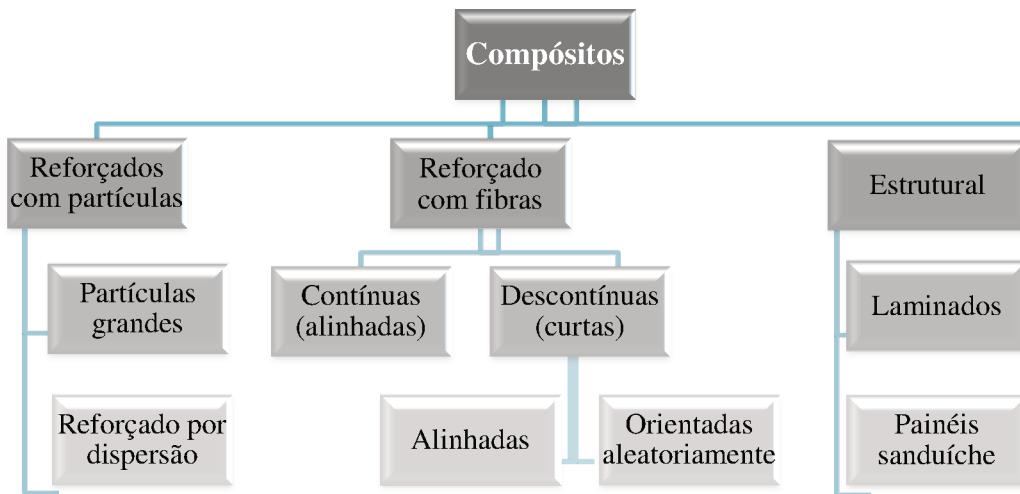
3.2 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Material compósito de grande versatilidade e amplamente utilizado em construções de pequeno a grande porte, o concreto é um dos mais importantes materiais quando se leva em questão o sistema estrutural. Isto ocorre devido a gama de vantagens como excelente resistência à água, facilidade de execução dos elementos, versatilidade de forma e tamanho, além de ser um material de menor custo e maior facilidade de obtenção.

Compósitos são materiais formados por pelo menos duas fases distintas, compostas por materiais quimicamente diferentes com uma interface bem definida (CALLISTER JR., 2008; MALLICK, 1997). Os materiais constituintes mantêm suas características individuais (ao menos a nível microscópico) dentro do compósito ainda que a combinação entre estes produza propriedades e características finais da composição que sejam diferentes daquelas de cada material constituinte.

A utilização de materiais compósitos dá-se, pois com a união de mais de um tipo de elemento ou fase, é possível combinar as propriedades de cada um destes para produzir assim um material com características finais superiores às individuais. De acordo com Callister Jr. (2008), esta ideia é chamada de princípio da ação combinada, no qual melhores combinações de propriedades são criadas por uma união sensata de dois ou mais materiais diferentes isolados. Ainda de acordo com o autor, os materiais compósitos podem ser classificados simplificadamente em três grupos: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais. Podem ainda serem divididos em subclasses como ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma de classes e subclasses de compósitos



Fonte: Adaptado de Callister Jr. (2008).

Segundo Callister Jr. (2008), o concreto é classificado como um compósito comum com partículas grandes. Este tipo de compósito é caracterizado por apresentar duas fases essenciais: a matriz, uma fase que é contínua e que envolve a fase dispersa, a segunda fase. As

fases presentes devem ser de materiais diferentes e ter sua interface definida. No caso do concreto tanto a fase matriz quanto a fase dispersa são compostas de materiais cerâmicos.

Segundo Ramos (2002) e Watanabe (2008), apesar da grande quantidade de vantagens que o concreto apresenta, é um material que também possui certas limitações. O concreto simples, sem armadura, apresenta comportamento frágil e pequena capacidade de deformação quando comparado a outros materiais como o aço. Além disto, o concreto possui baixa resistência mecânica à tração. Estas são algumas das características que levam ao estudo e análise de soluções que visem minimizar estes pontos negativos e tornar o concreto um material completo.

Uma destas possíveis soluções é a adição de fibras nos elementos de concreto. A utilização das fibras tem vários objetivos desde melhorar propriedades como a resistência à tração ou compressão até o controle da fissuração superficial. Cada um destes objetivos de utilização variam de acordo com o tipo, proporção e propriedades específicas de cada tipo de fibra utilizado.

Apesar da utilização comercial e da pesquisa sobre o uso de fibras no concreto terem aumentado há poucos anos, a adição de fibras em compósitos é feita há mais de 3000 anos, quando se utilizava palha para reforço de tijolos, como ilustrado na Figura 20, e crina de cavalo adicionada em materiais cimentícios (RODRIGUES; MONTARDO, 2002). Mas as pesquisas sobre emprego de fibras retas se iniciaram apenas na década de 60. Foi observado um desempenho superior durante as análises de comportamento mecânico dos compósitos (ALMEIDA FILHO; EL DEBS M.; EL DEBS A., 2008).

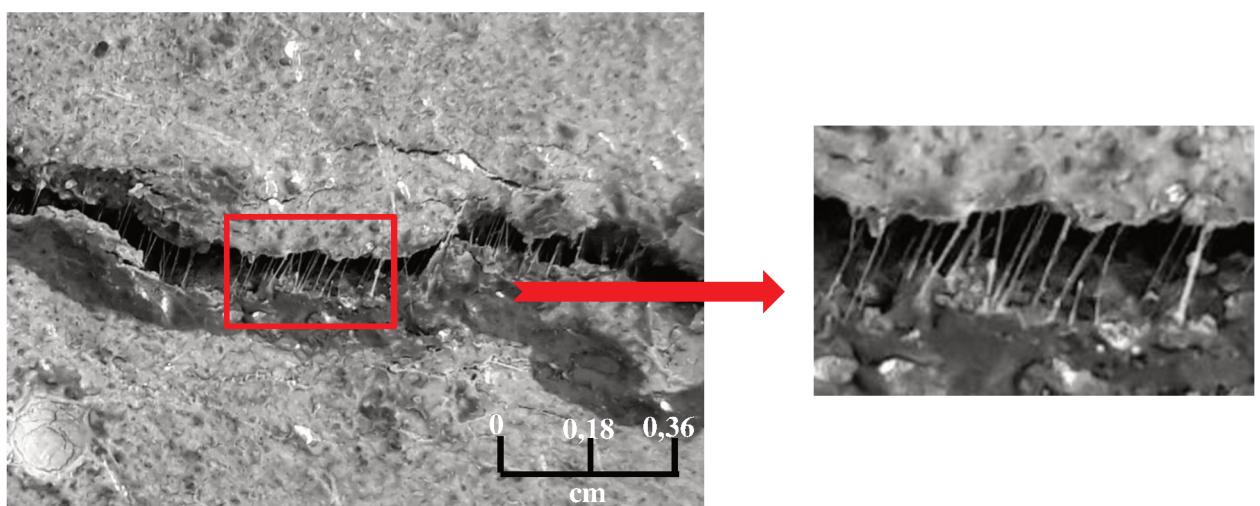
Figura 20 – Tijolo adobe feito com mistura de terra crua, palha e fibras naturais



Fonte: Sustentarte (2016). Disponível em: <http://sustentarte.org.br>. Acesso em: 10 mar. 2017.

Mas qual é o comportamento das fibras dentro do concreto? As fibras têm o papel de transferir tensões de tração internas, atuando como uma espécie de “costura” ou ponte de transferência quando, distribuídas aleatoriamente, atravessam as pequenas aberturas que surgem e evitam que as mesmas continuem seu processo de abertura (WATANABE, 2008). Este processo pode ser visto na Figura 21.

Figura 21 – Fibras atuando como ponte de transferência



Fonte: Autor (2018).

O termo concreto reforçado com fibras pode ser definido como um concreto que contém fibras aleatoriamente dispersas. Inerentemente o concreto é frágil aos esforços de tração, mas suas propriedades mecânicas podem ser melhoradas apenas com o acréscimo de fibras, também é possível obter um aumento da resistência ao impacto, aumento da resistência à fadiga e acréscimo na ductilidade. Além disto, as fibras também podem impedir ou controlar a iniciação, propagação e coalescência de fissuras e ainda atuar na prevenção do efeito *spalling*, também conhecido como lascamento (SILVA, 2013; YADEGARAN *et al.*, 2007).

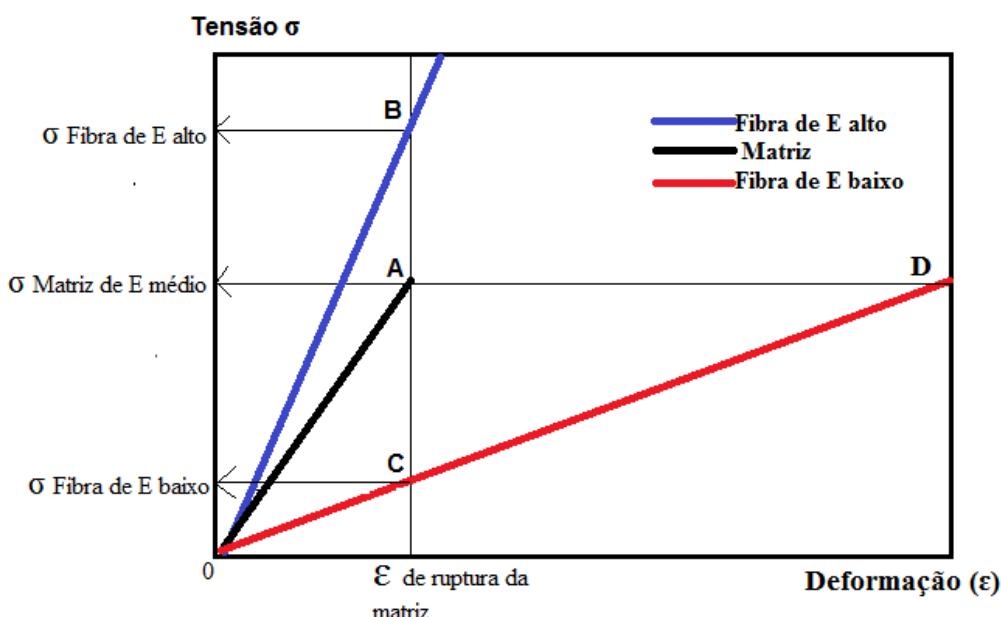
3.2.1 Tipos de fibra

As fibras podem ser classificadas em três tipos essenciais: naturais, artificiais orgânicas e artificiais inorgânicas. Sendo cada uma destas oriundas de um determinado processo produtivo (DOBBIN JUNIOR; ROCHA, 2011). De acordo com Bentur e Mindess (2007) quando as fibras são utilizadas para reforço em compósitos cimentícios estas podem ser classificadas em dois grupos: reforço primário e reforço secundário. Fibras com a característica de atuar como reforço primário têm objetivo de provocar um aumento na

resistência e tenacidade do compósito. Já fibras que atuam com a função de reforço secundário ou reforço local têm o principal objetivo de controlar a fissuração causada por variações de umidade ou temperatura. Desta forma, é interessante salientar que no segundo caso, as fibras não são utilizadas para incrementar as características mecânicas do compósito, apesar disto, um pequeno aumento na resistência algumas vezes é notado como resultado de seu uso.

É o material constituinte da fibra que irá definir o módulo de elasticidade e a resistência mecânica da mesma, duas propriedades que são consideradas as mais importantes para determinar a capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto. Como são fibras de diferentes propriedades e objetivos de utilização, podem ser agrupadas como fibras de baixo módulo e fibras de alto módulo. As fibras de baixo módulo são aquelas que possuem módulo de elasticidade inferior ao concreto endurecido, como as fibras poliméricas. Já as fibras de alto módulo são aquelas que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto endurecido, como as fibras de aço e carbono. Esta diferença pode ser vista na Figura 22 que apresenta um diagrama de tensão x deformação para a matriz cimentícia (em preto), fibra de baixo módulo (vermelho) e fibra de alto módulo em azul (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 22 – Diagrama de tensão por deformação elástica da matriz e fibras



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2011).

Pelo gráfico é possível notar que, no ponto em que a matriz atinge sua tensão de ruptura (A), as fibras de baixo módulo, para a mesma deformação, o nível de tensão atingido pela fibra (C) é bem mais baixo do que o da matriz, assim seria necessário um maior volume de fibras para conseguir absorver os esforços, o que inviabilizaria seu uso. Sendo assim, fibras de baixo módulo são indicadas para serem utilizadas como reforço secundário do concreto, no período em que o mesmo ainda apresenta baixa resistência e pequeno módulo de elasticidade, ou seja, com o concreto ainda fresco. Já se fossem utilizadas fibras de alto módulo e alta resistência, no momento em que a matriz chegasse a tensão de ruptura (A), a fibra apresentaria um alto nível de tensão (B) e seria eficiente para reforçar a matriz, ou seja para incrementar as propriedades mecânicas do compósito (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO, 2011).

No caso das fibras de alto módulo, mesmo com esta característica, se possuírem uma baixa resistência à tração, sua capacidade de reforço pós-fissuração será reduzida ou até inexistente. Pois as fibras não serão eficientes para absorver as tensões que a matriz transmite para estas. Dessa forma, só são consideradas fibras com capacidade de reforço das matrizes cimentícias, aquelas que apresentam maior capacidade de deformação na ruptura e maior resistência à tração que a matriz de concreto (FIGUEIREDO, 2011).

Assim, as fibras para incremento das propriedades mecânicas, como as fibras de aço, têm sido utilizadas em pavimentos, concreto projetado e em tanto outros tipos. Fibras sintéticas são utilizadas como reforço secundário, para controlar a abertura de fissuras causadas pela retração plástica. Além disto, uma nova geração de “fibras poliméricas estruturais” está sendo aplicada para controle da fissuração no concreto endurecido. Fibras naturais são utilizadas em materiais construtivos de baixo custo (BENTUR; MINDESS, 2007). Cabe observar que todas as vantagens de se utilizar as fibras e a eficiência destas dependem de fatores como:

- tipo de fibra (fibra sintética, fibra metálica, fibra de vidro);
- geometria da fibra (seção, comprimento);
- aderência entre fibra e matriz;
- concentração na mistura;
- propriedades como ponto de fusão e neutralidade química, entre outros.

3.2.1.1 Fibras sintéticas

Fibras sintéticas têm sido usadas como adição em elementos de concreto desde o final dos anos 1960 e são cada vez mais utilizadas para reforço de materiais cimentícios. As propriedades das fibras sintéticas variam muito em relação à resistência e módulo de elasticidade. Por isto, características gerais dos principais tipos de fibras são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Tipos de fibra e suas características

Tipo de fibra	Diâmetro (μm)	Peso específico (g/cm^3)	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento na ruptura (%)
Acrílico	20 - 350	1,16 - 1,18	0,20 - 1,00	14 - 19	10 - 50
Aramida	10 - 12	1,44	2,30 - 3,50	63 - 120	2 - 4,50
Carbono	9 - 18	1,60 - 1,21	0,50 - 3,10	30 - 480	0,50 - 2,40
Náilon	23 - 400	1,12	0,75 - 1,00	4,10 - 5,20	16 - 20
Poliéster	10 - 200	1,34 - 1,39	0,23 - 1,20	10 - 18	10 - 50
Polietileno	25 - 1000	0,92 - 0,96	0,08 - 0,60	5	3 - 100
Polipropileno	20 - 400	0,90 - 0,95	0,45 - 0,76	3,50 - 10	15 - 25
Aço	100 - 1000	7,84	0,50 - 2,60	210	0,50 - 3,50
Matriz cimentícia	-	1,50 - 2,50	0,003 - 0,007	10 - 45	0,02

Fonte: Traduzido e adaptado de Bentur e Mindess (2007).

A maioria das fibras sintéticas tem módulo de elasticidade inferior ao da matriz cimentícia, por isto são utilizadas como reforço secundário do concreto nas primeiras horas após o lançamento do concreto, período em que o mesmo ainda apresenta baixa resistência e pequeno módulo de elasticidade. Desta forma, isto torna este tipo de fibra viável para combater os efeitos da retração plástica (BENTUR; MINDESS, 2007; FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002; GOMES, 2005). Segundo Silva (2013), vale ressaltar que a utilização das fibras não elimina a necessidade de realização de uma boa cura, mas atuam no sentido de minimizar o risco de fissuração.

As grandes vantagens da utilização deste tipo de material junto ao concreto são: baixo custo relativo e são elementos duráveis, fáceis de serem adicionados à mistura, não há segregação, são feitos de matérias-primas de fácil localização e aquisição, não sofrem grandes modificações com as intempéries e, além disto, há uma grande quantidade benefícios adquiridos ao elemento compósito final.

Com baixas porcentagens de adição de fibras poliméricas, com teores entre 0,10% a 0,20% em geral, foi notada redução na retração dos elementos e em consequência a redução da formação de fissuras durante o período de cura (MELIÁN; BARLUENGA; HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2010).

3.2.1.2 Fibras de Polipropileno (PP)

De todos os tipos de fibras sintéticas as fibras de polipropileno destacam-se porque não são um material caro, são inertes ao ambiente de alto pH cimentício, ou seja, são resistente aos ácalis e são de fácil dispersão (BANTHIA; GUPTA, 2006; YADEGARAN *et al.*, 2007). Além disto, segundo Bentur e Mindess (2007), as fibras de polipropileno têm recebido melhoramentos em relação às propriedades de superfície e composição química. Por esta razão vários trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos para analisar e comprovar a eficácia das fibras de polipropileno como reforço do concreto.

Segundo Kumar *et al.* (2015), as fibras de polipropileno são da família dos produtos químicos de poliolefina. São fibras quimicamente inertes, que não enferrujam e não sofrem corrosão ou deterioração. As fibras de polipropileno podem ser macrofibras ou microfibras. As microfibras por sua vez podem ser monofilamentos ou fibriladas. Estes dois tipos possuem praticamente as mesmas propriedades de resistência e módulo de elasticidade, mas em termos de realizar o controle de fissuração as fibras de monofilamentos são mais efetivas do que as fibriladas (BENTUR; MINDESS, 2007). De acordo com Shoenberger e Tom (1992), fibras em monofilamentos, foco deste trabalho, são produzidas por um processo de extrusão através dos orifícios em uma fieira e, em seguida, cortadas no comprimento desejado.

Como existem diferentes parâmetros das fibras tais como diâmetro, comprimento e geometria deformada e considerando que estes podem influenciar na sua eficiência como reforço, diferentes autores como Banthia e Gupta (2006); Aly, Sanjayan e Collins (2008); Dobbi

Junior e Rocha (2011) e Bagherzadeh, Faramarzi e Gorji (2010) indicam em seus trabalhos que os melhores resultados são encontrados para fibras mais longas e de menor diâmetro quando o objetivo é controlar a fissuração por retração. Estes dois fatores estão ligados diretamente com o fator de forma (λ) ou de relação de aspecto, calculado a partir da divisão do comprimento individual da fibra pelo diâmetro equivalente, pois quanto maior o comprimento ou menor o diâmetro, maior é o fator de forma e desta forma, maior a eficiência (FIGUEIREDO, 2011). Segundo Nunes (2006), um menor diâmetro significa um menor espaçamento entre as fibras e um maior número de fibras atuando como ponte de transferência de tensões e assim há um melhor aproveitamento do material.

Segundo Bentur e Mindess (2007) há uma contradição entre a geometria da fibra para possibilitar maior trabalhabilidade ao concreto e a geometria requerida para uma máxima eficiência para o concreto endurecido. Isto se dá porque longas fibras de menores diâmetros serão mais eficientes para promover melhora das propriedades do concreto endurecido, mas farão o concreto fresco ter sua trabalhabilidade reduzida. Uma possível solução seria modificar a reologia da matriz para aumentar a trabalhabilidade, fato este que pode ser feito com o uso do concreto autoadensável.

3.2.2 Interface e interações entre matriz e fibra sintética

É necessário que se conheça a interface entre os materiais que compõem o concreto reforçado com fibras e a interação que ocorre entre eles, pois estas características exercem grande efeito que devem ser levados em consideração, especialmente em relação à ligação entre a fibra e a matriz e o processo de descolagem através desta interface.

Analizando as propriedades internas é possível notar que os compósitos com a matriz de cimento possuem uma zona de transição entre seus constituintes após a hidratação. Quando a fibra é adicionada a este composto há a criação de uma interface entre a zona de transição e o material de reforço que é diferente do restante da matriz de pasta. A matriz na vizinhança da fibra é muito mais porosa do que do restante da matriz. Observou-se que esta zona de transição é rica em CH (usualmente em contato direto com a superfície da fibra). A formação de uma zona rica em CH na superfície da fibra é provavelmente o resultado de sua precipitação a partir da solução no espaço ao redor da fibra, com a superfície da fibra sendo um local de nucleação (BENTUR; MINDESS, 2007).

A natureza e o tamanho desta interface dependem do tipo de fibra e da tecnologia de produção a serem adotadas. Além do mais, há a variação das características desta interface consideravelmente com o tempo pelo fato de ocorrerem reações químicas que alteram a composição e forma dos constituintes do composto. Alterando também, por consequência, as propriedades internas e mecânicas da estrutura. Há algumas características como um alto teor de alumina no cimento, gesso ou uma variedade de cimentos especiais que têm sido produzidos que têm por objetivo aumentar a durabilidade do compósito ou minimizar a interação química entre as fibras e a matriz (BENTUR; MINDESS, 2007).

Quanto à interação entre a fibra e a matriz há três tipos de interações que são particularmente interessantes: a adesão física e química; atrito gerado entre ambos e a ancoragem mecânica. Este último é explicado pelo processamento de fibras mais macias por meios especiais, como a extrusão, por exemplo, pode resultar em alterações interfaciais marcadas associadas à abrasão da fibra e à sua fibrilação, resultando em uma adesão aprimorada desde que não comprometa a seção do material (BENTUR; MINDESS, 2007).

O trabalho pioneiro sobre fibras sintéticas enfatizou a necessidade de superar as desvantagens especialmente devido à fraca ligação com a matriz. Este foi particularmente um problema com muitas das primeiras fibras sintéticas, devido à sua composição química e propriedades de superfície. Quanto às fibras de polipropileno a estrutura química do polipropileno torna-o hidrofóbico em relação à matriz cimentícia, levando a uma redução da ligação com o cimento e afetando negativamente sua dispersão na matriz.

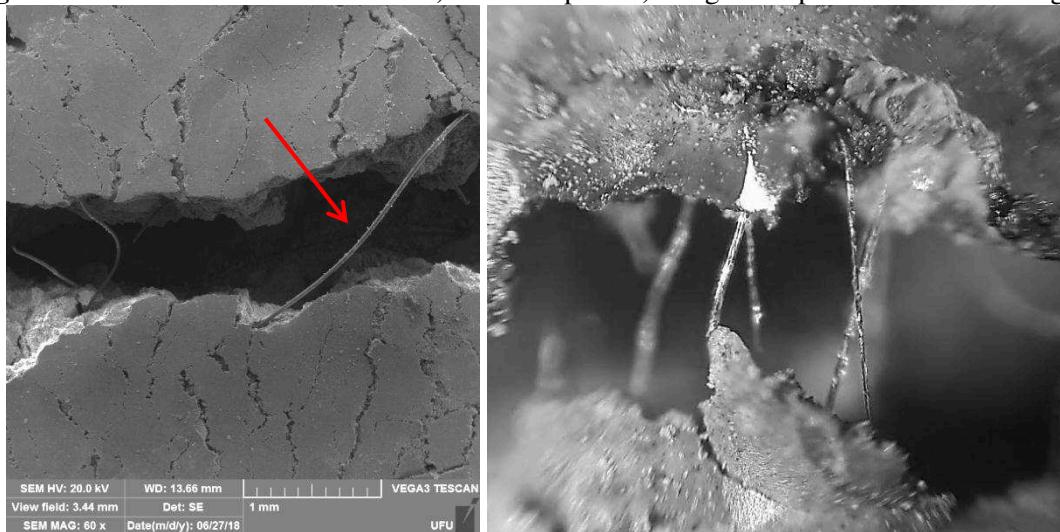
Assim, a maioria das fibras sintéticas desenvolvidas para a concreto reforçado com fibras é submetida a vários tratamentos de superfície para melhorar o umedecimento das fibras a fim de superar essas desvantagens. Avanços neste campo, em particular com fibras de polipropileno, só se tornaram viáveis quando se reconheceu que fibras com propriedades especiais tinham que ser desenvolvidas para aplicações de cimento e concreto. Deve ser notado, no entanto, que muitas das modificações modernas das fibras possuem propriedade, ou seja, as informações relativas às mudanças induzidas na estrutura da fibra não estão prontamente disponíveis na literatura aberta (BENTUR; MINDESS, 2007).

3.2.3 Uso de fibras para controle de fissuração no concreto

Segundo Kakooei *et al.* (2012), o controle da fissuração do concreto é de grande importância para uma maior duração dos elementos ao longo do tempo e resistência nas primeiras idades. A justificativa é que as fissuras geradas criam pontos críticos em que há o aumento da sensibilidade superficial do concreto tornando o mesmo suscetível a ataques externos que podem danificar a armadura. Desta forma, o desempenho, a necessidade de manutenção, duração dos elementos e estética das estruturas de concreto também são reduzidas.

Uma das mais importantes razões para o uso de fibras para reforçar o concreto é aumentar a estabilização das tensões geradas durante a abertura de fissuras especialmente por retração plástica com uma característica de reforço secundário ou reforço local (KAKOOEI *et al.*, 2012). As fibras têm a característica de atuar como uma ponte de transferência das tensões superficiais geradas durante a cura do concreto, reduzindo a tensão existente e por consequência o tamanho da abertura destas fissuras, conforme pode ser visto na Figura 23. Segundo Bagherzadeh, Faramarzi e Gorji (2009) os resultados variam de acordo com tamanho e porcentagem usados durante a fabricação dos elementos. Fibras utilizadas para reforço secundário são geralmente de baixo módulo e são adicionadas a baixos teores (menos que 0,3% em volume).

Figura 23 – Fibra dentro do concreto. a) Microscopia e b) Imagem ampliada com câmera digital



Fonte: Autor (2018).

A norma ABNT NBR 6118: 2003 apresenta recomendações para dimensões máximas de abertura de fissuras para o concreto armado, sendo:

- Para classe de agressividade CAA I (fraca): $\leq 0,4$ mm;
- Para classe de agressividade CAA II e III (moderada a forte): $\leq 0,3$ mm;
- Para classe de agressividade CAA IV (muito forte): $\leq 0,2$ mm.

3.2.4 Cálculo do título das fibras

De acordo com Bentur e Mindess (2007) e com empresas fabricantes das microfibras de polipropileno, são utilizadas unidades de medidas do seguimento têxtil para calcular o título da fibra. Desta forma não é o diâmetro, mas sim o título que é utilizado para caracterização do material. Essa escolha se dá em virtude das fibras terem diâmetro muito pequeno e da possibilidade de ocorrerem variações deste valor durante o processo de fabricação.

O título é a relação entre a massa e o comprimento de um fio. Assim, o título pode ser calculado da seguinte forma. Retira-se uma amostra de 1 metro dos filamentos aglomerados antes do corte. Pesa-se essa amostra, multiplica-se este valor pela metragem correspondente ao título dado e divide-se pelo número de furos da matriz de extrusão. A titulação está dividida em dois grupos, sendo sistema direto e sistema indireto. No caso das fibras de polipropileno em que o comprimento é constante e o peso variável, é utilizado o sistema direto, a partir do sistema *Denier* ou sistema *Tex* (muito utilizado o *Dtex*).

Denier é a representação da quantidade de gramas por 9 km de extensão da amostra. Ou seja, se você esticar um filamento contínuo por 9 km o peso dele será o valor do *Denier* em gramas. Também é utilizado o título *Dtex* que é equivalente ao peso em gramas por 10 km de extensão da amostra. Podem ser utilizados também testes de microscopia, como comparativo deste procedimento. Além deste método experimental, o título também pode ser calculado pela fórmula apresentada na Equação 1, disponibilizada pela empresa fabricante.

$$T = \varnothing^2 \times \left(\frac{\pi}{4} \times h \times P \right)$$

Equação 1

Em que,

T é o título da fibra em gramas;

\varnothing é o diâmetro da fibra em metros;

h é a extensão do filamento em metros;

P é a densidade da fibra em g/m^3 .

É possível observar que o título pode ser calculado em função do diâmetro, ou seja, se houver a inversão das variáveis também é possível calcular o diâmetro estimado em função do título e das outras variáveis da Equação 1. Isolando então o diâmetro na Equação 1, resultará a Equação 2, e assim será possível estimar este valor aproximado em metros.

$$\varnothing = \sqrt{\frac{T}{\left(\frac{\pi}{4} \times h \times P\right)}}$$

Equação 2

3.3 CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE FIBRAS

As fibras podem ser utilizadas como reforço para aprimorar as qualidades do CAA da mesma forma em que são utilizadas no concreto convencional. Segundo Aslani e Nejadi (2013) o concreto autoadensável reforçado com fibras é conhecido como FRSCC, sigla para *Fiber-reinforced self-compacting concrete*. Este tipo de concreto é um material compósito relativamente recente que é capaz de combinar os benefícios do concreto autoadensável com a adição de fibras em matrizes frágeis de cimento. É um material dúctil que da mesma forma que o concreto autoadensável, no seu estado fresco, é capaz de fluir dentro da fôrma, preenchendo a mesma e passando por obstáculos se consolidando apenas sobre a ação do próprio peso.

Este novo compósito é capaz de minimizar os efeitos de duas fraquezas do concreto opostas entre si: a inferior trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras (CRF) e a resistência à fissuração do concreto convencional (CC).

Quanto à trabalhabilidade do CRF a utilização de fibras no concreto pode influenciar em função de alguns parâmetros como: volume de fibra, tipo de fibra, geometria da fibra, proporção de fibra. Esta redução da trabalhabilidade é um obstáculo para a utilização do concreto com fibras *in loco* devido à dificuldade existente de manipulação do material. Por isto com a combinação das propriedades do concreto reforçado com fibras com o concreto

autoadensável pode ser provido um método de produzir um concreto autoadensável reforçado com fibras que terá propriedades superiores não só no estado endurecido, mas também no estado fresco (YADEGARAN *et al.*, 2007; ASLANI; NEJADI, 2013).

Alguns estudos têm sido realizados para otimizar a proporção da mistura de fibras sejam metálicas ou de polipropileno no concreto autoadensável mas não existem pesquisas suficientes que avaliem as propriedades mecânicas do FRSCC. Em termos de propriedades mecânicas, a maior desvantagem de materiais cimentícios é a vulnerabilidade à fissuração, que geralmente ocorre nas primeiras idades das estruturas de concreto. A ocorrência de fissuração pode potencialmente reduzir a vida útil das estruturas de concreto e causar sérios problemas de durabilidade e manutenção.

Diferentes estudos já foram feitos visando analisar o desempenho das fibras metálicas incorporadas ao concreto autoadensável enquanto o uso das fibras de polipropileno e seus efeitos para reduzir a retração deste tipo de concreto não foram estudados propriamente antes (YADEGARAN *et al.*, 2007).

3.3.1 Fissuração e o concreto autoadensável

Devido à alta taxa de finos, o CAA pode apresentar uma maior taxa de retração e fluênciа nas primeiras idades em comparação com o concreto convencional. Esta alta taxa de finos se dá em função do CAA apresentar um maior volume de pasta e uma quantidade maior de agregados de menor diâmetro. Embora alguns autores relatem um comportamento e similar e até mesmo uma taxa menor de retração em comparação com o concreto convencional com o mesmo comportamento no estado endurecido. Esta discrepância pode ser explicada pela diferença de materiais utilizados em cada caso, especialmente a porção de finos, agregados e adições minerais. Além disto, pode haver interferência da proporção entre os materiais utilizada. (ASLANI; NEJADI, 2013; BARLUENGA; HERNÁNDEZ-OLIVARES, 2007; LOSER; LEEMANN, 2009; TURCRY *et al.*, 2006) .

De acordo com Barluenga e Hernández-Olivares (2007), o concreto autoadensável, assim como qualquer outro compósito de matriz cimentícia, aumenta sua capacidade mecânica ao longo do tempo sendo que imediatamente após moldado o comportamento mecânico é

plástico e sua capacidade resistente é insignificante. Desta forma, antes de completar o período de cura o risco de fissuração é máximo.

Ainda segundo os autores, o uso de frações volumétricas baixas de fibras curtas, com teores entre 0,15% a 0,20% em geral, têm sido descrito como uma medida efetiva para controle de fissuração de concreto autoadensável. Como a quantidade de fibra é muito baixa, e o objetivo é controlar mecanismos que ocorrem durante as primeiras idades do concreto, não pode ser considerada como um reforço mecânico, mas um reforço local.

A eficiência das fibras curtas no controle de fissuração do concreto nas primeiras idades depende da forma e das dimensões da fibra e da relação entre as propriedades mecânicas da fibra e do concreto que variam com o tempo, com o tipo de fibras e o concreto e as condições ambientais. A quantidade de fibras a ser adicionada deve ser a mais baixa possível para não influenciar na consistência fresca da mistura. Não deve exceder 1 kg/m³ (EFNARC, 2002). Considerando a densidade da fibra de polipropileno como 0,91 kg/m³ este valor seria correspondente a 0,11% de volume de fibras em relação ao volume de concreto.

CAPÍTULO 4

PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para analisar o processo de retração hidráulica do concreto autoadensável foi realizado ensaio experimental baseado na norma *ASTM C1579:2013* com adaptações do autor. A partir disto, determinou-se que variáveis a serem analisadas seriam o fator de forma das fibras de polipropileno e o volume a ser adicionado.

Baseado nos trabalhos de Aarthi e Arunachalam (2017); Yadegaran *et al.* (2007); Aly, Sanjayan e Collins (2008); Bagherzadeh, Faramarzi e Gorji (2010); Kakooei *et al.* (2012); Pelisser *et al.* (2010) e também nas recomendações da norma ASTM C1579:2013 determinou-se que as porcentagens em volumes de fibras utilizadas seriam de: **0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20%** em relação ao volume total de concreto. Há alguns autores como Elaty e Ghazy (2017); Yehia *et al.* (2016); Dobbi Junior e Rocha (2011) e Abd Elaty, Ghazy (2017) que recomendam uma porcentagem mais elevada de 0,25% a 1%, mas de acordo com EFNARC (2002) e, a partir de experimentos pilotos realizados em laboratório, como esperado constatou-se que as fibras sintéticas podem impedir o fluxo e descharacterizar as propriedades do concreto autoadensável, por isso devem ser utilizadas com limitação.

Quanto ao comprimento e diâmetro das fibras foi interessante analisar qual o nível de influência destas propriedades físicas. Para analisar essas características e tendo em vista as fibras obtidas, foram ensaiadas amostras de concreto com fibras de 6, 12 e 24 mm de comprimento com as mesmas propriedades físicas e mecânicas e fibras com 10 mm de comprimento com propriedades diferentes das demais.

Cruzando estas variáveis e considerando um número de 4 amostras para cada cruzamento foram realizados 34 ensaios no total e produzidas 68 amostras. Este planejamento é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Número de amostras para cada cruzamento de variáveis

CF \ VF	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Sem fibras	4	-	-	-	-
6 mm	-	4	4	4	4
12 mm	-	4	4	4	4
24 mm	-	4	4	4	4
10 mm	-	4	4	4	4

Fonte: Autor (2018).

Sendo:

CF – Comprimento de fibra;

VF – Volume de fibra.

Também foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos com concreto autoadensável e sem fibras para realizar um ensaio de caracterização quanto à resistência à compressão aos 28 dias.

4.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais a serem utilizados na produção dos corpos de prova dos ensaios deste trabalho estão descritos a seguir.

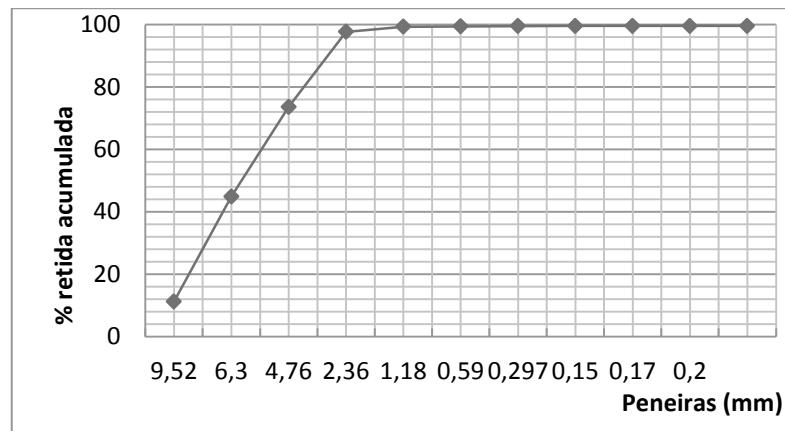
4.2.1 Agregado graúdo

Foi utilizado agregado graúdo de basalto de indicação zero, com valores característicos destacados na Tabela 8 e granulometria apresentada na Figura 24.

Tabela 8 – Características físicas do agregado graúdo

Característica	Resultado	Norma
Massa específica (g/cm^3)	2,27	ABNT NM 52 (2009)
Massa unitária (estado solto) (g/cm^3)	1,56	ABNT NM 45 (2006)
Massa unitária (compactado) (g/cm^3)	1,62	ABNT NM 45 (2006)
Dimensão Máxima (mm)	9,50	ABNT NM 248 (2003)
Módulo de Finura	5,80	ABNT NM 248 (2003)

Fonte: Autor (2018).

Figura 24 – Curva granulométrica do agregado graúdo

Fonte: Autor (2018).

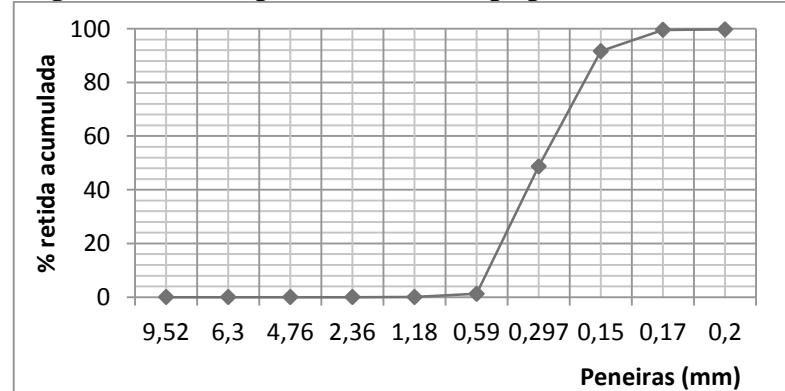
4.2.2 Agregado miúdo: Areia Fina

Foi utilizado como agregado miúdo a areia fina lavada de rio da região do Triângulo Mineiro. As características do agregado miúdo são apresentadas na Tabela 9. E sua curva granulométrica na Figura 25.

Tabela 9– Características físicas do agregado miúdo areia fina

Característica	Resultado	Norma
Massa específica (g/cm^3)	2,67	ABNT NM 52 (2009)
Massa unitária (estado solto) (g/cm^3)	1,50	ABNT NM 45 (2006)
Dimensão Máxima (mm)	1,18	ABNT NM 248 (2003)
Módulo de Finura	1,42	ABNT NM 248 (2003)

Fonte: Autor (2018).

Figura 25 – Curva granulométrica do agregado miúdo areia fina

Fonte: Autor (2018).

4.2.3 Agregado miúdo: Pó de pedra

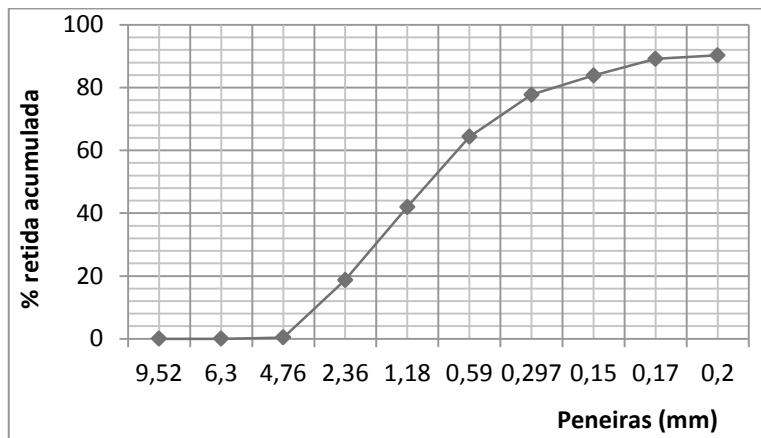
Conhecido também como pó de brita este agregado miúdo foi adicionado com o objetivo de aumentar a porcentagem de finos da mistura e garantir as propriedades requeridas do concreto autoadensável. Suas características são apresentadas na Tabela 10 e sua curva granulométrica ilustrada na Figura 26.

Tabela 10 – Características físicas do agregado miúdo pó de pedra

Característica	Resultado	Norma
Massa específica (g/cm^3)	2,84	ABNT NM 52 (2009)
Massa unitária (estado solto) (g/cm^3)	1,53	ABNT NM 45 (2006)
Dimensão Máxima (mm)	4,76	ABNT NM 248 (2003)
Módulo de Finura	2,87	ABNT NM 248 (2003)

Fonte: Autor (2018).

Figura 26 – Curva granulométrica do agregado miúdo pó de pedra



Fonte: Autor (2018).

4.2.4 Cimento

Foi utilizado cimento CP V- ARI, cimento Portland de alta resistência inicial que de acordo com ensaio de caracterização realizado (ABNT NM 23:2001) possui massa específica de $3,03 \text{ g}/\text{cm}^3$. Outras características estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Cimento Portland

Características	Descrição	
	Norma ABNT	Produto
	NBR 5733	CP V ARI
Propriedades Químicas – Teores (%)		
Perda ao fogo (%)	≤ 4,50	4,17
Óxido de magnésio (MgO)	≤ 6,50	4,37
Trióxido de enxofre (SO_3) para $\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$	≤ 3,50	3,15
Resíduo Insolúvel (RI)	≤ 1,00	0,68
Propriedades Físicas e Mecânicas		
Tempo de pega – início (min)	≥ 60	161,25
Tempo de pega – final (min)	≤ 600	262,19
Expansibilidade à quente (mm)	≤ 5,00	0,97
Água de consistência (%)	Sem valores	31,73
Finura (%) #200	≤ 6	0,01
Finura (%) #325	Sem valores	0,24
Blaine (cm^2/g)	≥ 3000	5477,50
Resistência à compressão (MPa) – 1 dia	≥ 14,00	28,19
Resistência à compressão (MPa) – 3 dias	≥ 24,00	35,68
Resistência à compressão (MPa) – 7 dias	≥ 34,00	40,89
Resistência à compressão (MPa) – 28 dias	Sem valores	50,41

Fonte: Adaptado de Manual Técnico do fabricante (2018).

4.2.5 Água

Na produção das amostras foi utilizada água potável proveniente do sistema de abastecimento de água do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia (DMAE).

4.2.6 Aditivo

O aditivo utilizado foi o aditivo sintético superplastificante a base de policarboxilatos. Suas propriedades são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Aditivo superplastificante

Propriedades do aditivo	
Tipo de produto	Superplastificante
Densidade	1,09 g/cm ³
Dosagem recomendada	0,2 a 5,0% do peso de cimento
Estado	Líquido
Cor	Marrom

Fonte: Adaptado de Manual Técnico do fabricante (2015).

4.2.7 Fibras sintéticas

Foram utilizadas fibras poliméricas de polipropileno de 6, 10, 12 e 24 mm (Figura 27). De acordo com os fabricantes, as fibras possuem as propriedades apresentadas na Tabela 13. De acordo com a UNE-EN 14889-2: 2008 são classificadas como fibras poliméricas de Classe Ia (microfibras monofilamentosas) referência àquelas que possuem diâmetro inferior a 0,30 mm de diâmetro.

Figura 27 – Fibras de polipropileno de a) 6 mm b) 12 mm c) 24 mm d) 10 mm

Fonte: Autor (2017).

Tabela 13 – Propriedades das fibras de polipropileno

Propriedades	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Propriedades Físicas				
Tipo de fibra	Microfibras	Microfibras	Microfibras	Microfibras
Comprimento (mm)	6	12	24	10
Denier	2,97	2,97	2,97	4,80
Diâmetro (μm)	21	21	21	28
Relação de aspecto (L/D)	286	571	1143	357
Seção	Circular	Circular	Circular	Circular
Alongamento na ruptura (%)	80	80	80	21
Peso específico (g/cm^3)	0,910	0,910	0,910	0,905
Propriedades mecânicas				
Resistência à tração (GPa)	0,3	0,3	0,3	0,032
Módulo de elasticidade (GPa)	3	3	3	1,15
Temperatura de fusão (°C)	160	160	160	152

Fonte: Adaptado de Manual Técnico do fabricante (s.a.).

4.3 DOSAGEM DO CONCRETO

Desta forma, a composição inicial do concreto autoadensável foi definida pelo traço em massa de 1 : 1,28 : 1,45 : 1,05: 0,45 (cimento: pó de pedra: areia fina: brita 0 : a/c) com adição de 1% de aditivo. Foram feitas modificações considerando a diferença entre a granulometria dos materiais e outras considerações definidas em ensaios piloto. Estas alterações são apresentadas nos Apêndices A e B. O objetivo principal das alterações, além da diferença entre os materiais, é aumentar o potencial de fissuração para que as fibras atuem desta. Logo, após dosagem e proporcionamento dos materiais foi obtido o traço final em massa de **1: 1,17 : 1,08 : 0,86 : 0,68** com **0,1%** de aditivo em relação a massa de cimento. O consumo dos materiais em m^3 é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Consumo de materiais por m^3 de concreto produzido

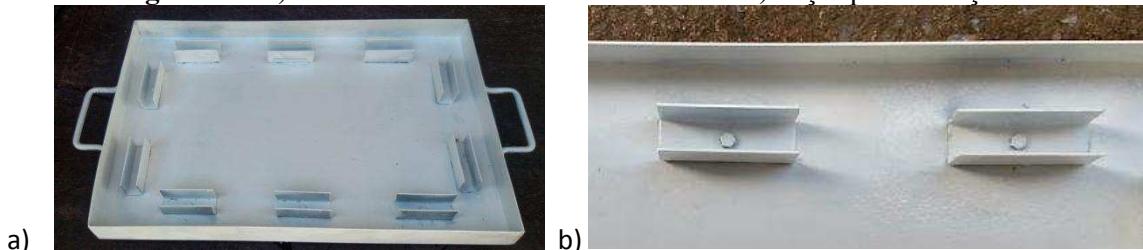
Cimento CP V (kg)	Pó de pedra (kg)	Areia fina (kg)	Brita 0 (kg)	Água (L)	Aditivo (g)
600	703	648	518	408	600

Fonte: Autor (2018).

4.4 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE CONCRETO

De acordo com o método de ensaio da ASTM C1579:2013 e com algumas modificações do autor previstas em ensaio piloto (Apêndice C), as placas utilizadas no ensaio foram metálicas de dimensões 360 x 560 x 50 mm e possuíam peças metálicas com seção em “U” posicionadas internamente de medida 25 x 35 x 75 mm para efeito de restrição interna (Figura 28).

Figura 28 - a) Painel metálico utilizado como forma b) Peças para restrição



Fonte: Autor (2018).

Todos os materiais listados anteriormente foram separados, dosados de acordo com as massas recomendadas pelo traço e posteriormente adicionados à betoneira com capacidade de 150 litros para mistura mecânica. Observando que a cada produção a betoneira recebeu imprimação prévia para que não houvesse aderência de material às paredes internas ou perda de água da mistura. A sequência de adição dos materiais foi: agregado graúdo, metade do volume da água, agregados miúdos, cimento, restante da água e, por fim, o aditivo. O concreto permaneceu em mistura por aproximadamente 8 minutos.

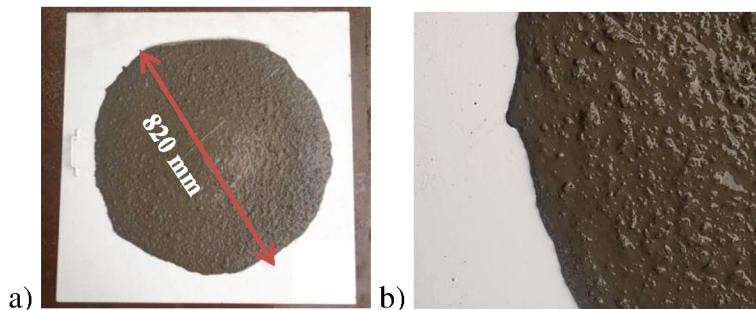
Depois deste tempo e antes de dar início a adição de fibras, foi feito o ensaio de caracterização para avaliar a trabalhabilidade pelo método do cone de Abrams ou também conhecido como *slump flow* no caso do concreto autoadensável. A execução do ensaio foi baseada na norma ABNT NBR 15823-2: 2010 - Concreto Autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams. Os instrumentos utilizados e a forma de execução para o método são ilustrados na Figura 29.

Figura 29 - Instrumentação do ensaio do método do cone de Abrams e execução do ensaio

Fonte: Autor (2018).

O método foi de simples execução, consistia em preencher o molde com uma amostra de concreto retirada com no máximo o tempo de 2 minutos de sua coleta, o qual era fixado por suas aletas pelo operador. Este preenchimento era realizado sem adensamento e de forma contínua e uniforme. No fim da operação, retirava-se o excesso de concreto da superfície e a desmoldagem foi efetuada levantando-se cuidadosamente o molde pelas alças na direção vertical. O espalhamento da massa de concreto era obtido pela média aritmética de três medidas do diâmetro dadas em centímetros.

Considerando os intervalos aceitáveis de *slump flow* definidos pela norma ABNT NBR 15823-2: 2010 de 550 a 850 mm e pela EFNARC (2002) de 650 a 850 mm e a redução da trabalhabilidade dada pela adição das fibras, foi definido o intervalo de 800 a 850 mm para aceitação do todo o concreto autoadensável produzido, como pode ser visto na Figura 30a. Como pode ser visto na Figura 30b não houve exsudação ou segregação do material.

Figura 30 - a) Ensaio com valor dentro do recomendado b) Detalhe da borda do espalhamento

Fonte: Autor (2018).

Com o concreto com a trabalhabilidade adequada dentro do intervalo definido, as fibras de polipropileno foram preparadas para serem adicionadas à mistura. Devido à forma que as

fibras vinham na embalagem do fabricante, com microfilamentos aglomerados, o primeiro passo foi separá-las manualmente para facilitar a mistura adequada no concreto. A diferença pode ser notada na Figura 31, à esquerda fibras ainda aglomeradas e à direita fibras já separadas manualmente.

Figura 31 - Preparação das fibras para adição no concreto



Fonte: Autor (2018).

Desta forma, foram pesadas, separadas e adicionadas à betoneira de modo aleatório e contínuo, como visto na Figura 32, forma de adição de acordo com Shoenberger e Tom (1992); Bentur e Mindess (2007); Banthia, Yan e Mindess (1996) entre outros autores. Depois da adição, de acordo com recomendações do fabricante e para melhor dispersão das mesmas, as fibras permaneceram em mistura por aproximadamente 10 minutos para que a mistura se tornasse homogênea.

Figura 32 - Fibras de polipropileno adicionadas de modo aleatório



Fonte: Autor (2018).

O concreto foi ensaiado novamente para avaliar a redução do *slump flow* com a incorporação de fibras. Como esperado, em todos os casos observou-se a redução de acordo com a proporção de fibra adicionada. Porém não foi notada exsudação ou segregação do material (Figura 33).

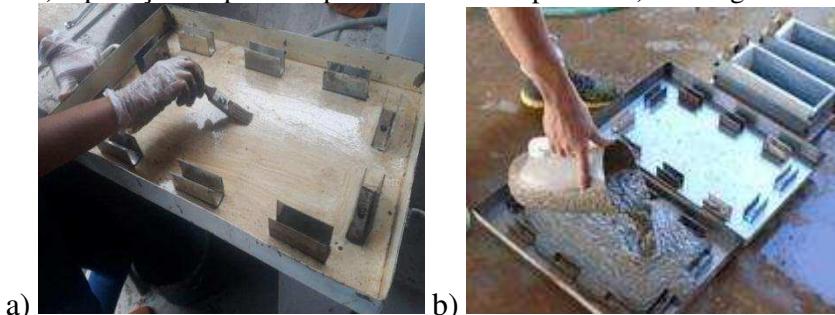
Figura 33 - Detalhe da borda do espalhamento – Concreto com fibras



Fonte: Autor (2018).

Depois disto, o concreto autoadensável com adição de fibras de polipropileno foi colocado nas placas que já haviam recebido óleo para evitar a aderência do material (Figura 34).

Figura 34 - a) Aplicação de produto para desforma na placa e b) Moldagem das amostras



Fonte: Autor (2018).

Em virtude do concreto ser autoadensável fluía apenas com o próprio peso sem o auxílio de qualquer tipo de vibração ou adensamento. Este procedimento também foi útil para avaliar as características que tornam o concreto autoadensável, pois o material se espalhou sem dificuldade após o lançamento nas fôrmas, mesmo com a presença das inclusões internas. Depois de colocado o concreto, as amostras receberam apenas um acabamento superficial para finalização. Finalizadas, as amostras em placa foram posicionadas dentro da máquina de ensaio padronizada para dar início ao teste.

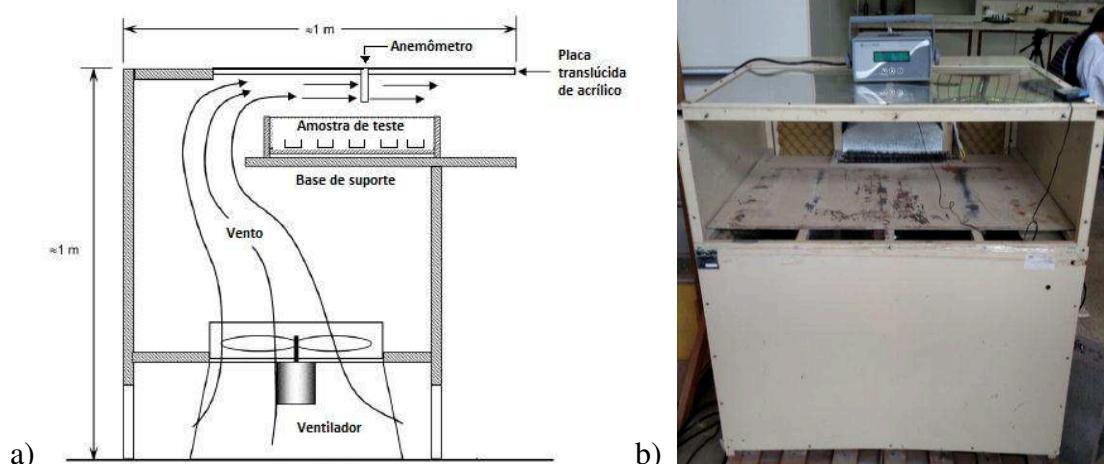
Quanto aos corpos de prova que seriam submetidos ao ensaio de resistência à compressão, foram moldadas quatro amostras de concreto autoadensável sem fibras, pois seriam utilizados apenas para caracterização do material. Foram utilizados moldes metálicos cilíndricos padronizados de dimensão 100 x 200 mm, que também recebiam a aplicação de óleo desmoldante previamente e que foram moldados sem necessidade de adensamento. Após 24 horas os corpos de prova foram desmoldados e colocam submersos em tanque com água saturada com cal no qual permaneciam até a idade de 28 dias (ABNT NBR 5738:2015).

4.5 METODOLOGIA DO ENSAIO EXPERIMENTAL

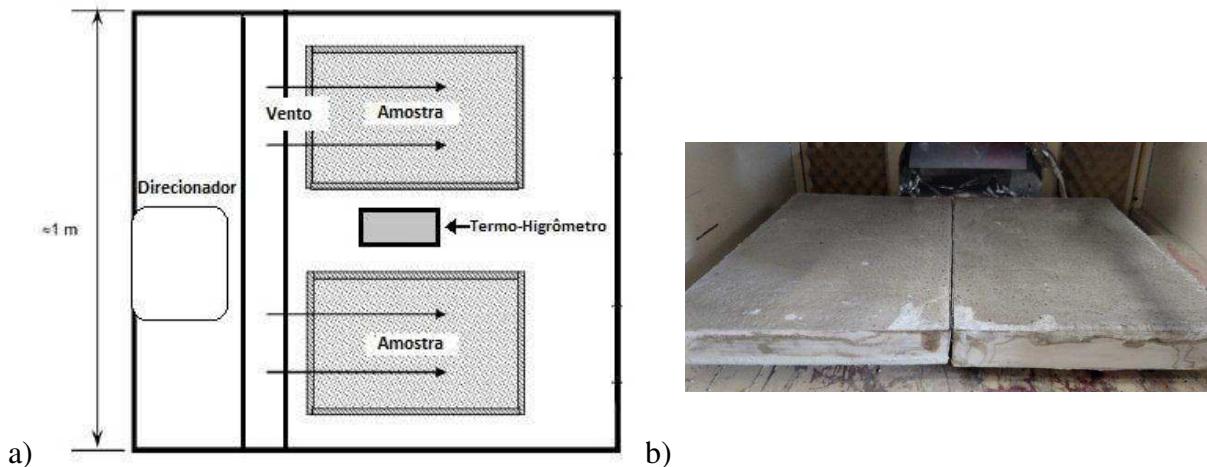
4.5.1 Método de ensaio ASTM C1579:2013

Depois de moldada as amostras foram posicionadas dentro da câmara para controle das variáveis externas como temperatura, umidade e vento (Figura 35 e 36).

Figura 35 – Câmara de ensaio em a) Esquema em perfil e b) Câmara de controle

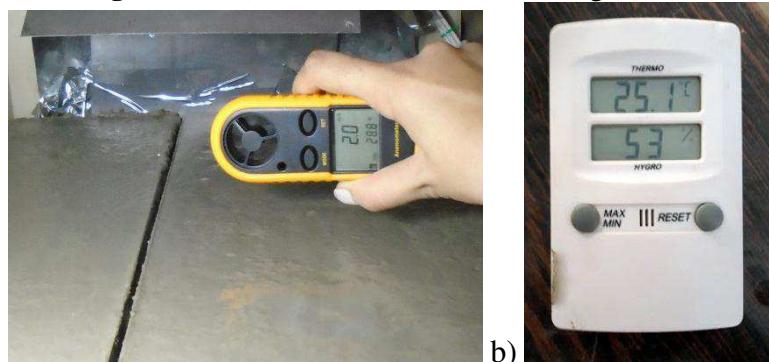


Fonte: Autor (2018).

Figura 36 – Câmara de ensaio em a) Esquema em planta e b) Esquema em perfil

Fonte: Autor (2018).

A medição das duas primeiras variáveis foi feita com um termo-higrômetro posicionado internamente e para medir a velocidade do vento foi utilizado um anemômetro (Figura 37). No caso da temperatura a média dos valores registrados foi de $25\pm 5^{\circ}\text{C}$ e quanto à umidade relativa foi registrado $48\pm 5\%$. Enquanto o anemômetro pôde determinar uma velocidade constante de 2 m/s medida 5 cm acima da placa durante todos os ensaios realizados. Alguns detalhes técnicos do ensaio tiveram diferenças da norma ASTM C1579:2013, em relação à instrumentação e condições de temperatura impostas, por exemplo, estas alterações e suas justificações são apresentadas no Apêndice C.

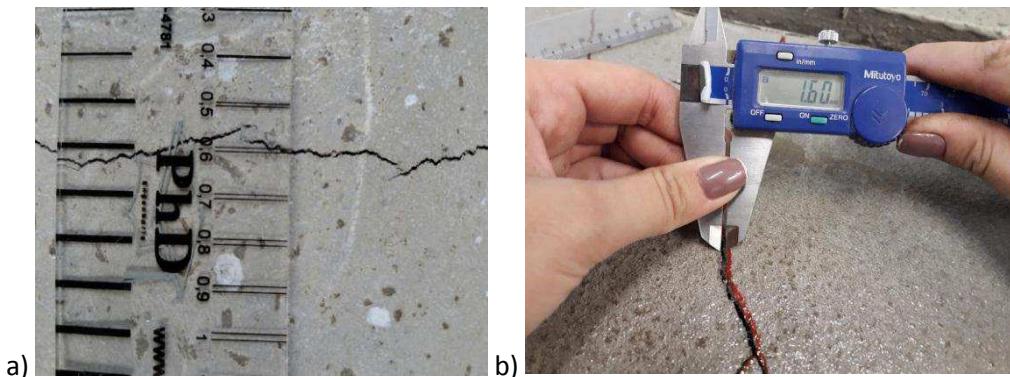
Figura 37 – a) Anemômetro e b) Termo-higrômetro

Fonte: Autor (2018).

Logo após o concreto ser produzido e colocado nas fôrmas foi cronometrado o tempo de execução do teste e as amostras permaneceram dentro da câmara por 24 horas, tendo em vista que este método de ensaio visa avaliar o processo de retração hidráulica que ocorre nas

primeiras idades do concreto. Após esse período, o vento foi desligado e as amostras foram retiradas para identificação com numeração da amostra e indicadores de fibras e análise das fissuras superficiais. Foram mensuradas as fissuras que ocorreram na superfície do painel em relação à espessura e comprimento. As fissuras foram medidas primeiro quanto à espessura, quando este valor variava, a medição interrompia-se e iniciava-se uma nova considerando uma fissura diferente. Desta forma, foi possível calcular a área de fissuração para cada amostra em milímetros quadrados. Para evitar que ocorressem erros de medida, não foram medidas as fissurações que registradas a menos de 25 mm das bordas da fôrma. A mensuração da fissuração superficial foi feita utilizando um fissurômetro e um paquímetro digital, especialmente caso a abertura de fissura ultrapassasse o valor de 1,5 mm (Figura 38).

Figura 38 – Medida das fissuras geradas com a) Fissurômetro e b) Paquímetro digital



Fonte: Autor (2018).

De acordo com a norma, os resultados também podem ser apresentados em forma de Taxa de redução de fissuração (TRF). Esta taxa é calculada para obter a relação entre a abertura de fissuras entre painéis de referência e painéis com fibras adicionadas, expressa em porcentagem e calculada pela Equação 3.

$$TRF = \left[1 - \frac{MF}{MC} \right] \times 100\%$$

Equação 3

Em que,

MF é a média de abertura de fissuras da amostra com reforço de fibras;

MC é a média da abertura de fissuras da amostra de controle.

4.5.2 Caracterização do concreto quanto à resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 5739: 2007 - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Corpos de prova de dimensão 100 x 200 mm, curados durante 28 dias, foram preparados superficial com regularização do topo por retífica, conforme a ABNT NBR 5738 (2016), e ensaiados na Máquina Universal Instron HDX Models com capacidade de 1000 kN (Figura 39).

Figura 39 – a) Aplicação da carga de compressão b) Corpo de prova após ruptura



Fonte: Autor (2018).

Após a realização do ensaio, a resistência à compressão foi calculada por meio da Equação 4.

$$f_c = \frac{4 \times F_{cr}}{\pi \times D^2}$$

Equação 4

Em que,

f_c é a resistência à compressão ou tensão de compressão (MPa);

F_{cr} é a força máxima alcançada (N);

D é o diâmetro do corpo de prova.

4.5.3 Caracterização das fibras utilizadas quanto ao diâmetro

Como visto na seção 3.2.5 deste trabalho o diâmetro estimado das fibras pode ser calculado a partir do valor do título de cada material. Tendo que os fabricantes das fibras obtidas forneceram o título *Denier*, este será utilizado como referência. Com este valor então, é possível estimar em micrômetros o valor do diâmetro destas fibras utilizando a Equação 2.

$$\varnothing = \sqrt{\frac{T}{(\frac{\pi}{4} \times h \times P)}}$$

Equação 2

Em que,

T é o título da fibra em gramas;

\varnothing é o diâmetro da fibra em metros;

h é a extensão do filamento em metros;

P é a densidade da fibra em g/m³.

CAPÍTULO 5

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nos itens que seguem serão apresentados resultados do ensaio realizado quanto à avaliação da retração hidráulica do concreto autoadensável. Além disto, também serão apresentados os resultados de caracterização mecânica do concreto autoadensável produzido sem fibras.

Considerando que para todos os ensaios foram feitas quatro amostras para reduzir a margem de erro e aumentar o nível de confiança dos resultados. Para melhor controle dos resultados obtidos foi utilizado o critério de *Chauvenet* para aceitação ou rejeição dos resultados. Este teste permite determinar se um valor amostral é discrepante em relação aos demais valores restantes da amostra, considerando uma distribuição normal. A descrição da forma de aplicação do critério de *Chauvenet* está apresentada no Anexo A e a aplicação do teste de *Chauvenet* está apresentada no Apêndice E.

Pelo critério de *Chauvenet* todos os resultados obtidos foram aceitos. Sendo assim, serão apresentados todos os valores individuais obtidos e a média final para análise. Medições de trabalhabilidade do concreto autoadensável no estado fresco a partir do método *slump flow* são apresentadas no Apêndice D.

5.1 RESULTADOS PARA O CONCRETO NAS PRIMEIRAS IDADES – FASE DE ENDURECIMENTO: MÉTODO DE ENSAIO ASTM C1579:2013

5.1.1 Caracterização das fibras utilizadas quanto ao fator de forma

Como foi apresentado anteriormente, estudos da literatura de Banthia e Gupta (2006); Aly, Sanjayan e Collins (2008) e Bagherzadeh, Faramarzi e Gorji (2010), indicam que a eficiência das fibras sintéticas está ligada diretamente a sua geometria e, portanto, ao fator de forma. Desta forma, antes de analisar os resultados obtidos é importante ter conhecimento desta relação para cada uma das fibras utilizadas.

Para calcular o fator de forma, é necessário ter conhecimento do comprimento e diâmetro das fibras. Para calcular o diâmetro, foi utilizada a Equação 2 apresentada anteriormente. A partir da Equação 2 e considerando as variáveis dadas, para as fibras de **6, 12 e 24 mm** de comprimento, o valor de diâmetro estimado é de aproximadamente **21 µm**. Já para as fibras de **10 mm**, o valor do diâmetro é de aproximadamente **28 µm**. Com estes dados, foi possível obter o fator de forma, apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Cálculo do fator de forma

Comprimento da fibra (mm)	Diâmetro (µm)	Fator de forma (λ)
6	21	286
12	21	571
24	21	1143
10	28	357

Fonte: Autor (2018).

5.1.2 Área de fissuração das amostras

Com o valor do fator de forma de cada, pode se analisar os resultados obtidos. De acordo com a metodologia apresentada na seção 4.5.1, as 48 amostras de concreto autoadensável reforçado com fibras e as 4 amostras de referência sem adição de fibras foram analisadas quanto à formação de fissuras superficiais. Como resultado desta análise, foram obtidos dados de abertura e comprimento de cada fissura gerada e assim tornou-se possível calcular a área de fissuração para cada painel produzido em relação ao teor de fibra adicionado. Estes resultados em mm^2 são apresentados nas Tabelas de 16 a 20 e a média final da área de fissuração apresentada na Tabela 21. Ressalta-se que a área de fissuração é o resultado do produto entre o comprimento e a abertura das fissuras, portanto sua análise tem o objetivo se analisar estes dois fatores de forma conjunta.

Tabela 16 – Área de fissuração – concreto sem fibras

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Área de fissuração (mm ²)		Média (mm ²)
Concreto sem fibras - Referência	0%	1317,00	862,50	1157,06
		928,00	1520,75	

Fonte: Autor (2018).

Tabela 17 – Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 6 mm

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Área de fissuração (mm ²)		Média (mm ²)	Taxa de redução de área de fissuração (TRF) (%)	Taxa de redução da abertura de fissura (TAF) (%)
6 mm	0,20%	405,00	247,00	328,25	71,63	72,19
		312,50	348,50			
6 mm	0,15%	456,50	226,00	361,38	68,77	68,16
		372,50	390,50			
6 mm	0,10%	415,00	334,00	554,99	52,03	53,18
		696,75	774,20			
6 mm	0,05%	655,00	682,00	616,38	46,73	41,89
		348,00	780,50			

Fonte: Autor (2018).

Tabela 18 - Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 12 mm

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Área de fissuração (mm ²)		Média (mm ²)	Taxa de redução de área de fissuração (TRF) (%)	Taxa de redução da abertura de fissura (TAF) (%)
12 mm	0,20%	208,00	7,00	145,88	87,39	59,27
		161,00	207,50			
12 mm	0,15%	112,50	322,00	316,00	72,69	51,99
		367,00	462,50			
12 mm	0,10%	549,00	363,50	339,73	70,64	40,73
		319,90	126,50			
12 mm	0,05%	390,00	403,00	343,00	70,56	29,44
		337,00	242,00			

Fonte: Autor (2018).

Tabela 19 - Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 24 mm

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Área de fissuração (mm ²)		Média (mm ²)	Taxa de redução de área de fissuração (TRF) (%)	Taxa de redução da abertura de fissura (TAF) (%)
24 mm	0,20%	0,00	0,00	2,69	99,77	97,02
		3,95	6,80			
24 mm	0,15%	21,00	18,50	20,38	98,24	84,11
		30,00	12,00			
24 mm	0,10%	185,75	89,50	163,94	85,83	78,39
		172,50	208,00			
24 mm	0,05%	420,00	280,00	353,75	69,43	41,99
		250,00	465,00			

Fonte: Autor (2018).

Tabela 20 - Área de fissuração e taxas de redução para o concreto com fibras de 10 mm

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Área de fissuração (mm ²)		Média (mm ²)	Taxa de redução de área de fissuração (TRF) (%)	Taxa de redução da abertura de fissura (TAF) (%)
10 mm	0,20%	0	0	106,69	90,78	88,93
		189,00	237,75			
10 mm	0,15%	101,00	55,00	147,94	87,21	73,68
		266,75	169,00			
10 mm	0,10%	639,50	427,50	488,50	57,78	63,53
		384,50	502,50			
10 mm	0,05%	691,10	346,00	507,40	56,15	61,89
		537,00	455,50			

Fonte: Autor (2018).

Tabela 21 – Média final da área de fissuração

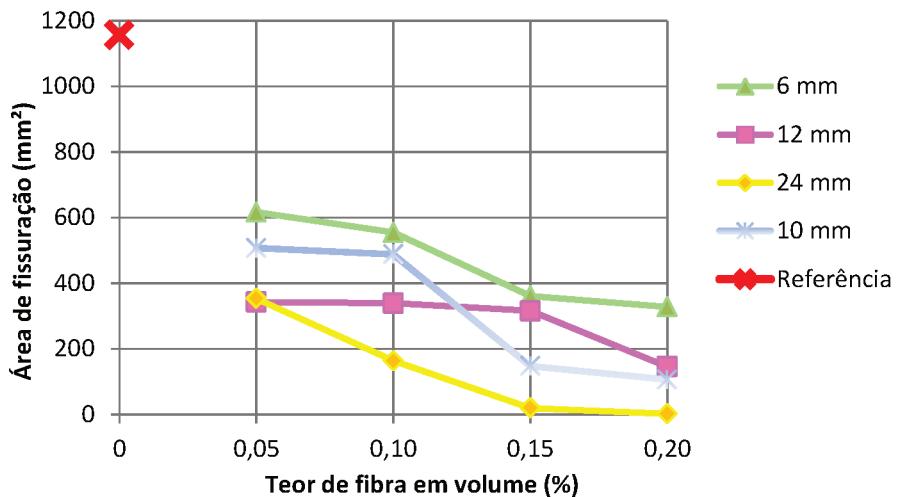
Comprimento da fibra	Fator de forma (λ)	Área de fissuração (mm ²)				
		0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Sem fibra	0	1157,06				
6 mm	286		616,375	554,99	361,38	328,25
12 mm	571		343,00	339,73	316,00	145,88
24 mm	1143		353,75	163,94	20,38	2,69
10 mm	357		507,40	488,50	147,94	106,69

Fonte: Autor (2018).

Cabe observar que dentre os quatro tipos de fibras utilizados as fibras de 6, 12 e 24 mm possuem propriedades físicas e mecânicas iguais e as fibras de 10 mm possuem outras propriedades. Desta forma, estes dois tipos de fibra serão analisados considerando estas variações. Além disto, durante os ensaios realizados foram feitas gravações de vídeo para ter conhecimento da média de tempo que as fissuras levariam para aparecer a olho nu na superfície das placas. O tempo gasto medido foi de 3 horas em média.

Observando os resultados apresentados na Tabela 21, é possível dizer que em relação ao concreto sem fibra houve uma redução na área de fissuração dos painéis com adição de microfibras de polipropileno, para todos os tipos analisados, que cresce com um aumento na proporção destas. Resultados que estão em concordância com o trabalho de Figueiredo (2011); Bentur e Mindess (2007); Banthia e Gupta (2006); Aly, Sanjayan e Collins (2008); Bagherzadeh, Faramarzi e Gorji (2010); Naaman, Wongtanakitcharoen e Hauser (2005) os quais dizem que quanto maior for o teor adicionado, maior é o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensão e menor o surgimento ou desenvolvimento de fissuras seja para fibras sintéticas ou fibras metálicas.

Pelo gráfico da Figura 40, é notado que de forma geral as fibras mais longas e que possuem maior fator de forma (considerando o mesmo diâmetro em média) são mais eficientes. Esta análise foi possível a partir da consideração de que estas fibras apresentam as mesmas propriedades físicas e mecânicas. Esta diferença pode ser vista de forma acentuada entre a fibra de 6 mm e de 24 mm. Resultados estes que estão de acordo com os trabalhos que analisam o uso de fibras de polipropileno adicionadas ao concreto, dos autores Banthia e Gupta (2006), Aly, Sanjayan e Collins (2008) e Bagherzadeh, Faramarzi e Gorji (2010), mesmo com os resultados destes autores sendo com a utilização do concreto convencional. Contudo, para baixos valores de volume de fibra adicionada nem sempre esta regra se satisfaz. Para a proporção de 0,05%, por exemplo, a fibra de 12 mm ($\lambda = 267$) é mais eficiente do que a fibra de 24 mm ($\lambda = 1043$).

Figura 40 – Área de fissuração x Teor de fibra

Fonte: Autor (2018).

Como foi dito, as fibras de 10 mm, como possuem diâmetro e propriedades diferentes deve ser analisada considerando estes fatores. Sua eficiência para reduzir a área de fissuração foi proporcional ao seu fator de forma que está entre os valores da fibra de 6 mm e da fibra de 12 mm para as proporções de 0,05% e 0,10%, já em relação às proporções de 0,15% e 0,20% se mostra superior à fibra de 12 mm, mesmo com menor fator de forma, provavelmente devido às diferenças de propriedades físicas e mecânicas.

Com os resultados obtidos também foi possível ser efetuada a análise da taxa de redução da área de fissuração do concreto sem fibra para o concreto com adição de fibras. Estas taxas estão representadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Taxa de redução de área de fissuração

Comprimento da fibra	Taxa de redução da área de fissuração (%)				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Referência	0				
6 mm		46,73	52,03	68,77	71,63
12 mm		70,36	70,64	72,69	87,39
24 mm		69,43	85,83	98,24	99,77
10 mm		56,15	57,78	87,21	90,78

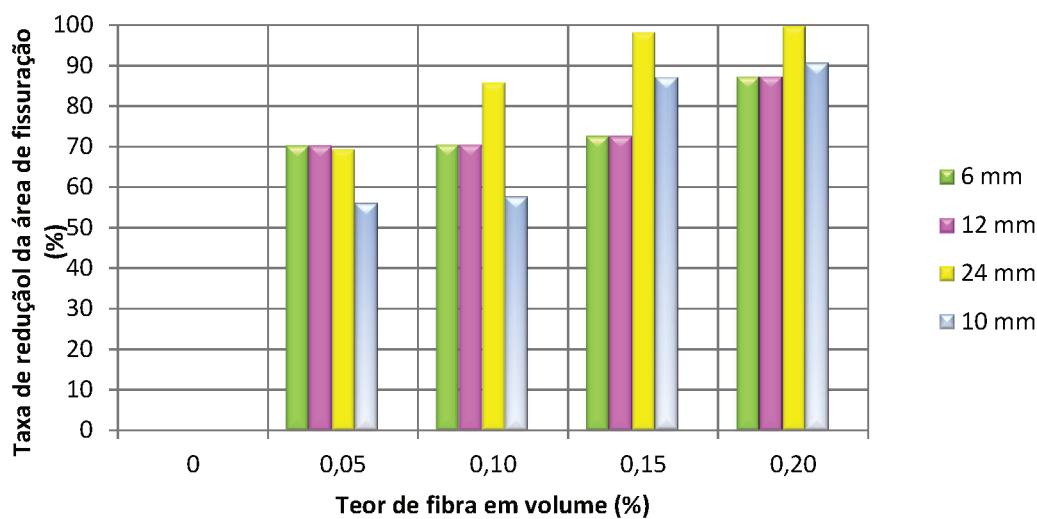
Fonte: Autor (2018).

Analizando a tabela vê-se que a eficiência das fibras de polipropileno para reduzir a área de fissuração pode chegar até a 99,77%, o que pode ser considerado quase uma redução total, em

relação ao teor de adição máximo ensaiado de 0,20% para a fibra de 24 mm. Mesmo nos casos de teores menores a redução também foi significativa, começando com 46,73% com a fibra de 6 mm chegando a 70,36% com a fibra de 12 mm. As fibras de 24 mm tiveram um aumento na redução mais significativa na mudança das proporções de 0,05% a 0,15% enquanto para as fibras de 12 mm a redução já se mostrou mais relevante entre 0,15% a 0,20%. Já para as fibras de 10 mm o salto relevante foi entre 0,10% e 0,15% enquanto as fibras de 6 mm mantiveram sua redução numa taxa mais constante de crescimento.

No gráfico da Figura 41 também é possível ver o destaque da taxa de redução da fibra de 24 mm em relação às demais. E a melhor eficiência para redução da área de fissuração das fibras de 10 mm para proporção acima de 0,10%.

Figura 41 – Taxa de redução de área de fissuração x Teor de fibra



Fonte: Autor (2018).

5.1.3 Abertura de fissura

Vale ressaltar que a área de fissuração leva em conta não só a abertura da fissura, mas a distribuição da mesma na superfície (número de fissuras). Em vista disto, também é importante avaliar de forma separada, apenas a abertura das fissuras, meio pelo qual é possível observar a efetividade do controle e absorção de tensões pelas fibras adicionadas. Da forma que, quanto menor a abertura da fissura, mais efetiva é a ligação e transferência de tensões. Tendo isto em vista, os resultados para a média de abertura de fissura são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Média de abertura de fissura

Comprimento da fibra	Média da abertura de fissura (mm)				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Referência	1,26				
6 mm	0,73	0,59	0,40	0,35	
12 mm	0,89	0,75	0,60	0,51	
24 mm	0,73	0,27	0,20	0,04	
10 mm	0,48	0,46	0,33	0,14	

Fonte: Autor (2018).

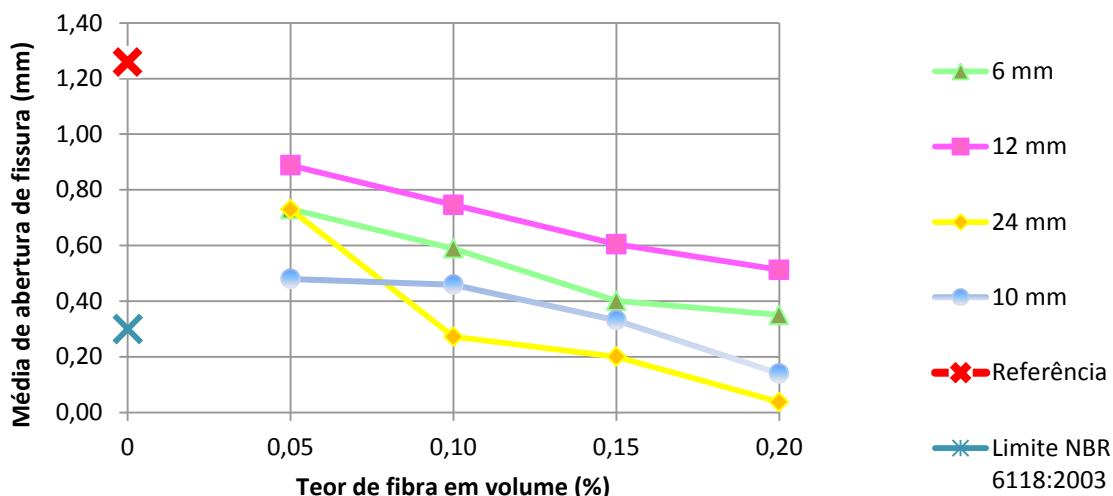
Essa diferença de análise entre a área de fissuração e a abertura de fissuras pode ser vista com mais clareza quanto à fibra de 12 mm e 6 mm, por exemplo. Em relação à área de fissuração o concreto com adição da primeira teve resultados menores em relação à segunda em todas as proporções. Mas em relação à abertura de fissura, as fibras de 6 mm adicionadas ao concreto tiveram melhores resultados. O que quer dizer que nas placas com fibras de 6 mm mesmo com uma abertura menor, a distribuição foi maior, ou seja, as fissuras se manifestaram de forma mais distribuída. Pode se considerar a hipótese de que as fibras com menor comprimento são mais efetivas durante o controle das tensões em relação às macrofissuras, mas não efetivas durante o surgimento das mesmas (microfissuras), já que elas se apresentam em maior quantidade. Do ponto de vista da durabilidade dos elementos, fissuras de menor abertura, chamadas microfissuras são menos prejudiciais do que as de maior abertura, já que quanto maior a abertura maior é a capacidade de permeabilidade de agentes externos nocivos à estrutura.

De qualquer forma, os melhores resultados são apresentados para a fibra de 24 mm. Na fibra de 24 mm com a adição de 0,20% a média de abertura de fissuras é de apenas 0,04 mm (praticamente não visualizável a olho nu), o que é uma redução considerativa considerando que as placas sem fibras tiveram uma média de 1,26 mm de abertura de fissura.

Quanto às recomendações normativas na ABNT NBR 6118: 2003, que regulamenta uma abertura de fissura considerada aceitável, para áreas urbanas, menor ou igual a 0,3 mm. O concreto sem fibras estaria fora do limite aceitável. Seriam aceitáveis: concreto com adição de fibras de 24 mm com volume maior ou igual 0,10%; concreto com adição de fibras de 10 mm com volume maior ou igual 0,20%. Os concretos produzidos neste trabalho com fibras de 6 e 12 mm mesmo com volume de 0,20% não seriam aceitáveis. O gráfico apresentado na Figura

42 mostra que a redução ocorre a uma taxa constante praticamente para todos os tipos de fibras e proporções. Com exceção das fibras de 24 mm, que da proporção de 0,05% para 0,10% ocorre uma queda mais acentuada.

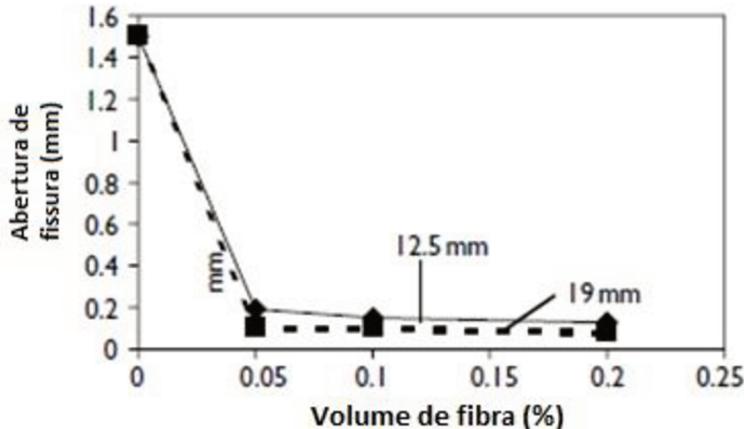
Figura 42– Média de abertura de fissura x Teor de fibra



Fonte: Autor (2018).

Na maioria das placas ensaiadas, a abertura de fissuras também apresenta maior redução para adição de fibras com maior fator de forma (ou seja, para fibras mais longas e mais delgadas) apenas com exceção das fibras de 12 mm como exemplificado anteriormente, que se mostram inferiores quanto a este quesito. Houve uma redução na eficiência notada na proporção de 0,05% para a fibra de 24 mm.

Pode ser feita a comparação com resultado apresentado no trabalho de Bentur e Mindess (2007) os quais analisam a influência das fibras de polipropileno no concreto convencional. Como poder ser visto pela Figura 43, fibras de 12,5 mm tem uma melhor eficiência reduzindo a abertura de fissura de 1,50 mm para 0,20 mm (cerca de 87%), em comparação com o resultado da adição da fibra de 12 mm com 0,05% de adição neste trabalho que é de 1,26 mm para 0,89 mm (aproximadamente 30%). Esta diferença pode ser explicada por diferentes diâmetros das fibras, propriedades de superfície que promovem um aumento na aderência, entre outros, já que o aumento no comprimento foi de pequena relevância.

Figura 43 – Gráfico que apresenta a média de abertura de fissura de acordo o volume de fibras

Fonte: Bentur e Mindess (2007).

5.1.4 Taxa de redução de abertura de fissura

Como previsto por norma *ASTM C1579:2013*, para avaliar o resultado da redução da abertura de fissura nas placas é indicado calcular a taxa de redução de abertura de fissura (TRF) apresentada na seção 4.5.1. Os resultados são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Taxa de redução de abertura de fissura

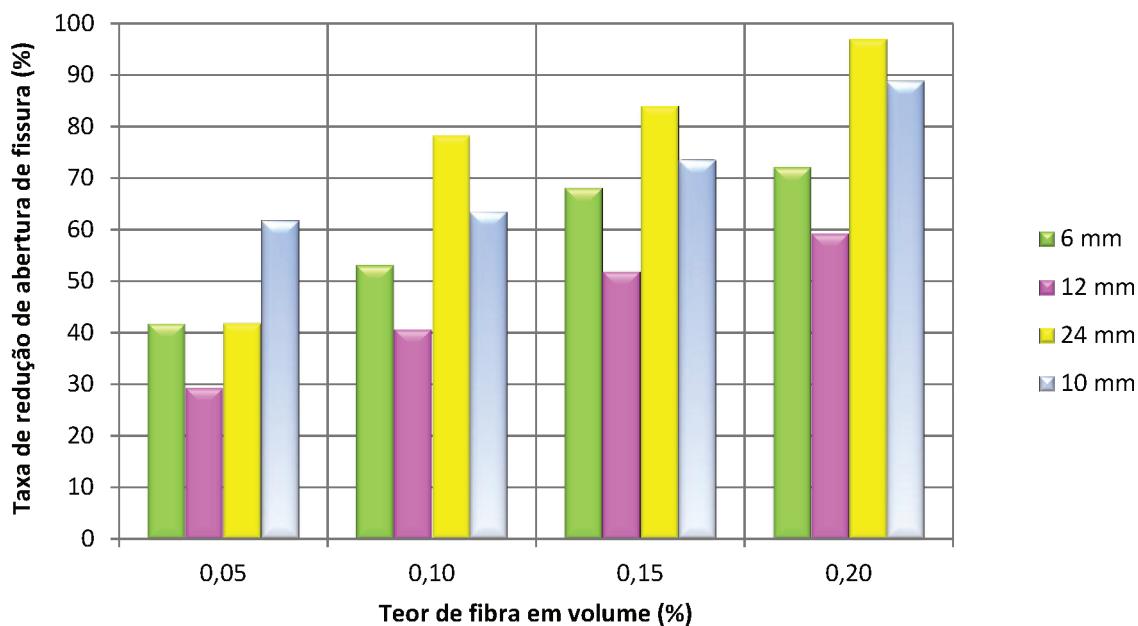
Comprimento da fibra	Taxa de redução da abertura de fissura (%)				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Referência	0				
6 mm		41,89	53,18	68,16	72,19
12 mm		29,44	40,73	51,99	59,27
24 mm		41,99	78,39	84,11	97,02
10 mm		61,89	63,53	73,68	88,93

Fonte: Autor (2018).

É possível observar que a maior taxa de redução de abertura de fissura foi para a fibra de 24 mm (com exceção da proporção de 0,05%). E em sequência para as fibras de 10 mm, 6 mm e apenas por último a fibra de 12 mm. A maior taxa de redução foi notada para a fibra de 24 mm, atingindo um valor de 97,02% para a máxima proporção de 0,20%. A maior diferença entre a evolução da taxa de redução foi notada para um aumento de 0,05% para 0,10% com aumento de quase 30% na taxa. Isso significa que a eficiência destas fibras se nota de forma mais acentuada para teores acima de 0,10% em volume. Em menores proporções a fibra de 24 mm não é tão eficiente quanto à fibra de 10 mm, por exemplo.

Em relação à fibra de 12 mm sua taxa abaixo das outras fibras pode indicar que este tipo de fibra possui uma menor eficiência em relação à diminuição da abertura da fissura e maior controle em relação a sua distribuição. Já que a fibra de 12 mm se mostrou eficiente para reduzir a área de fissuração. Os resultados são apresentados na Figura 44.

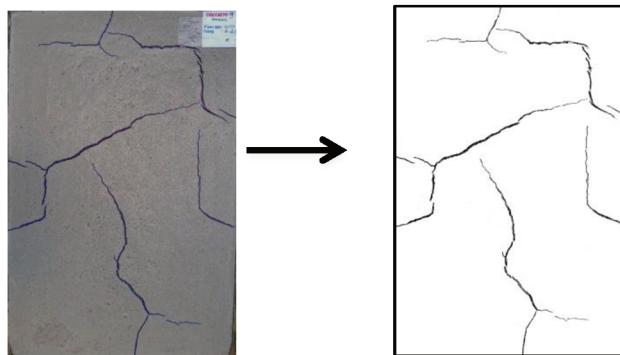
Figura 44 – Taxa de redução da abertura de fissura x Teor de fibra



Fonte: Autor (2018).

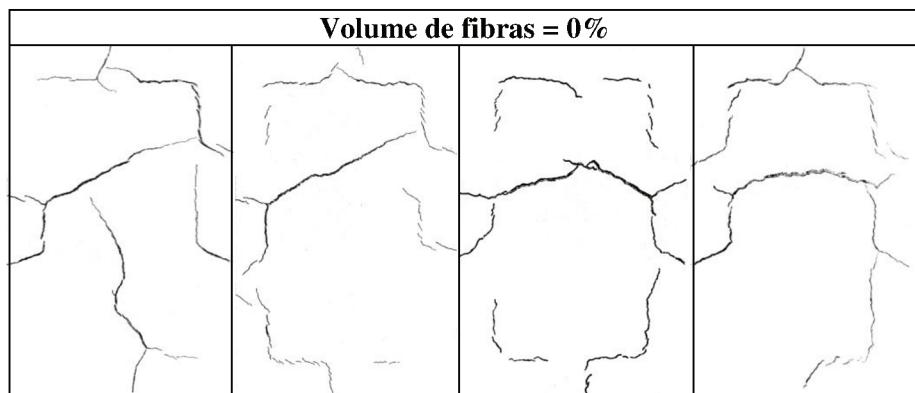
5.1.5 Resultados visuais das amostras em placa produzidas – Mapa de fissuração

Depois de feitas avaliações da área total de fissuração e da abertura das fissuras, também é importante avaliar a distribuição das fissuras nas placas a partir de análises visuais. Esta análise visual foi feita com o auxílio de uma câmera digital comum com resolução de 23 megapixels que registrou a placa após 24 horas de execução do teste. Procedimento executado para todas as placas produzidas (imagens disponibilizadas no Apêndice F). Com estas imagens registradas e com auxílio de um programa computacional, as mesmas foram editadas e obteve-se um “mapa de fissuração”. Neste “mapa” é possível identificar como ocorreu a distribuição de fissuras de acordo com a placa em questão. Um exemplo de uma imagem editada está na Figura 45.

Figura 45 – Edição de imagem para criar o mapa de fissuração

Fonte: Autor (2018).

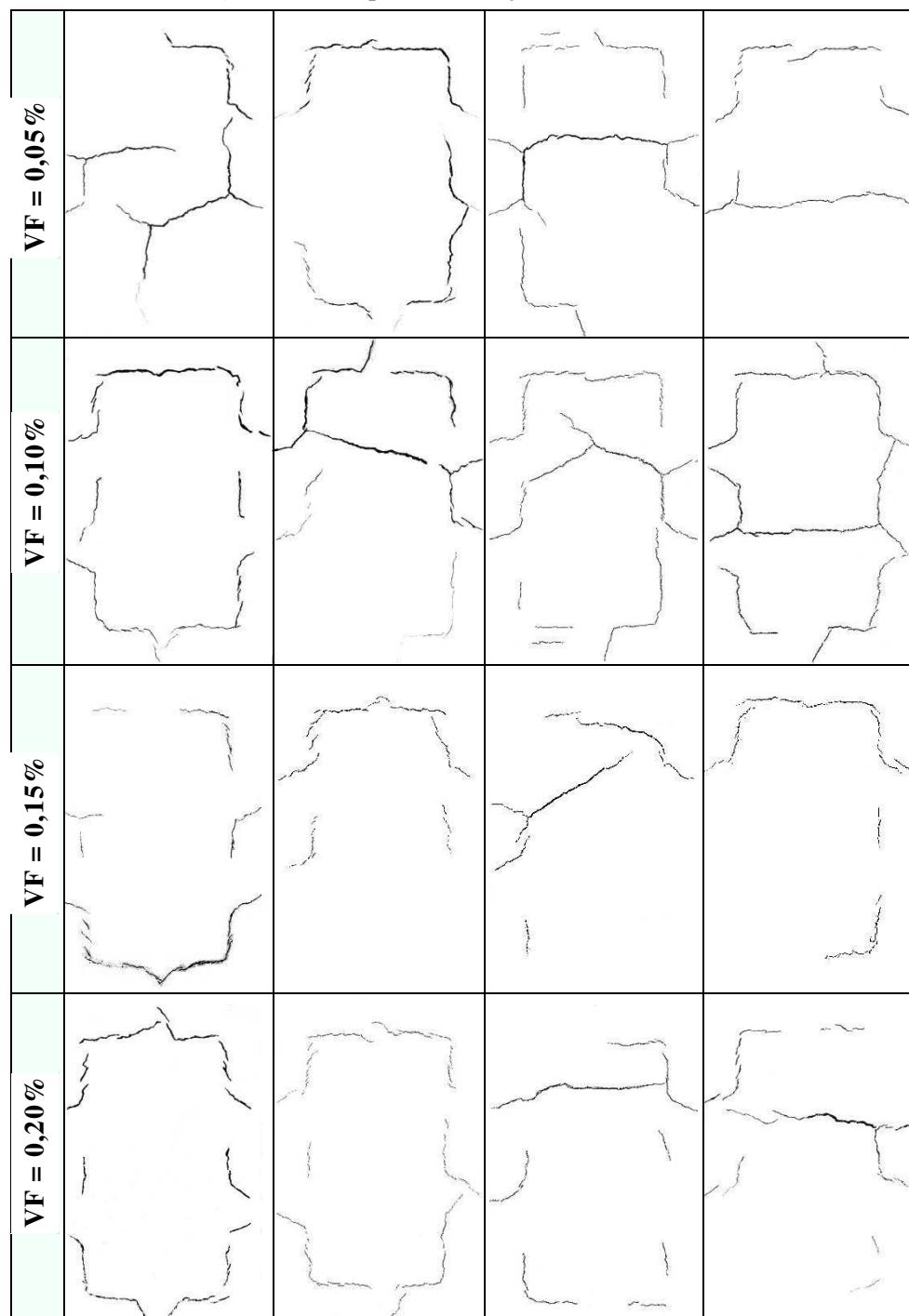
Os primeiros mapas de fissuração obtidos foram para as placas de concreto sem fibras utilizadas como referência, apresentadas na Figura 46.

Figura 46 – Mapa de fissuração do concreto sem fibras

Fonte: Autor (2018).

A partir das imagens geradas é possível identificar uma grande distribuição de fissuras em toda a área da placa. Como característica da retração hidráulica, os resultados são fissuras mapeadas ou em malha, ou seja, que se conectam e são distribuídas em toda a superfície e que podem acompanhar ou não o sistema de restrição imposto. No caso destas placas, surgiram fissuras que acompanharam o perímetro onde foram fixadas as peças metálicas para restrição de movimentação (geralmente conectadas) e, além disto, surgiram fissuras transversais localizadas geralmente no centro das placas. Dentre as quatro placas ensaiadas apenas uma apresentou fissura longitudinal (no sentido da maior dimensão) que não acompanha o sistema de restrição.

Resultados também foram gerados para as placas com adição de fibras. As placas com concreto com fibras de 6 mm são expostas na Figura 47.

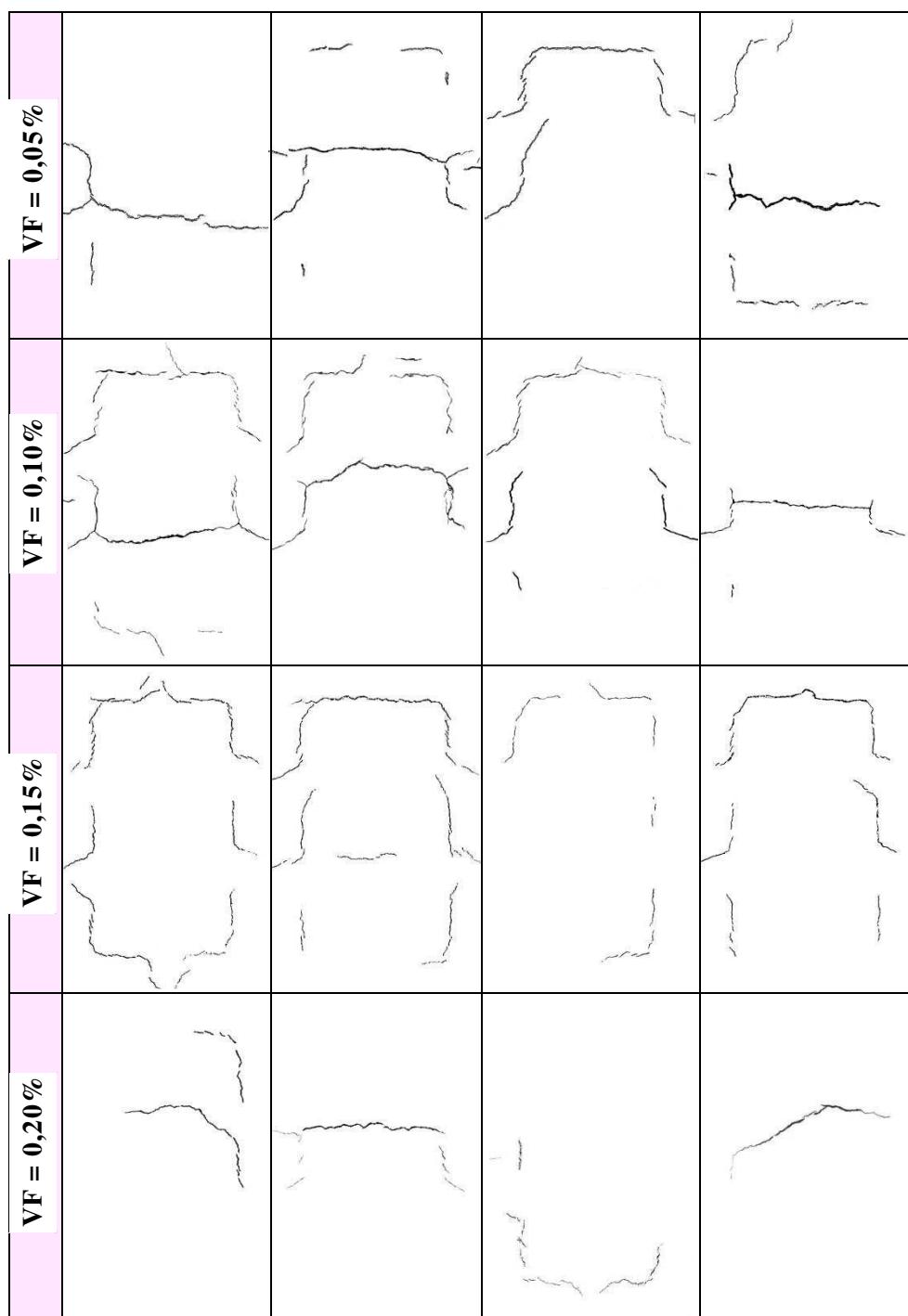
Figura 47 – Mapa de fissuração - fibras de 6 mm

Fonte: Autor (2018).

O concreto com fibras de 6 mm foi o que apresentou maior distribuição das fissuras na superfície, mesmo com o aumento do volume de adição de fibras. Com este aumento ocorreu uma redução da abertura das fissuras, mas a distribuição destas continuou bem similar. As posições em que não houve o surgimento de fissuras são àquelas na parte inferior das imagens, ponto este que estava posicionado a uma distância maior da fonte de vento atuante.

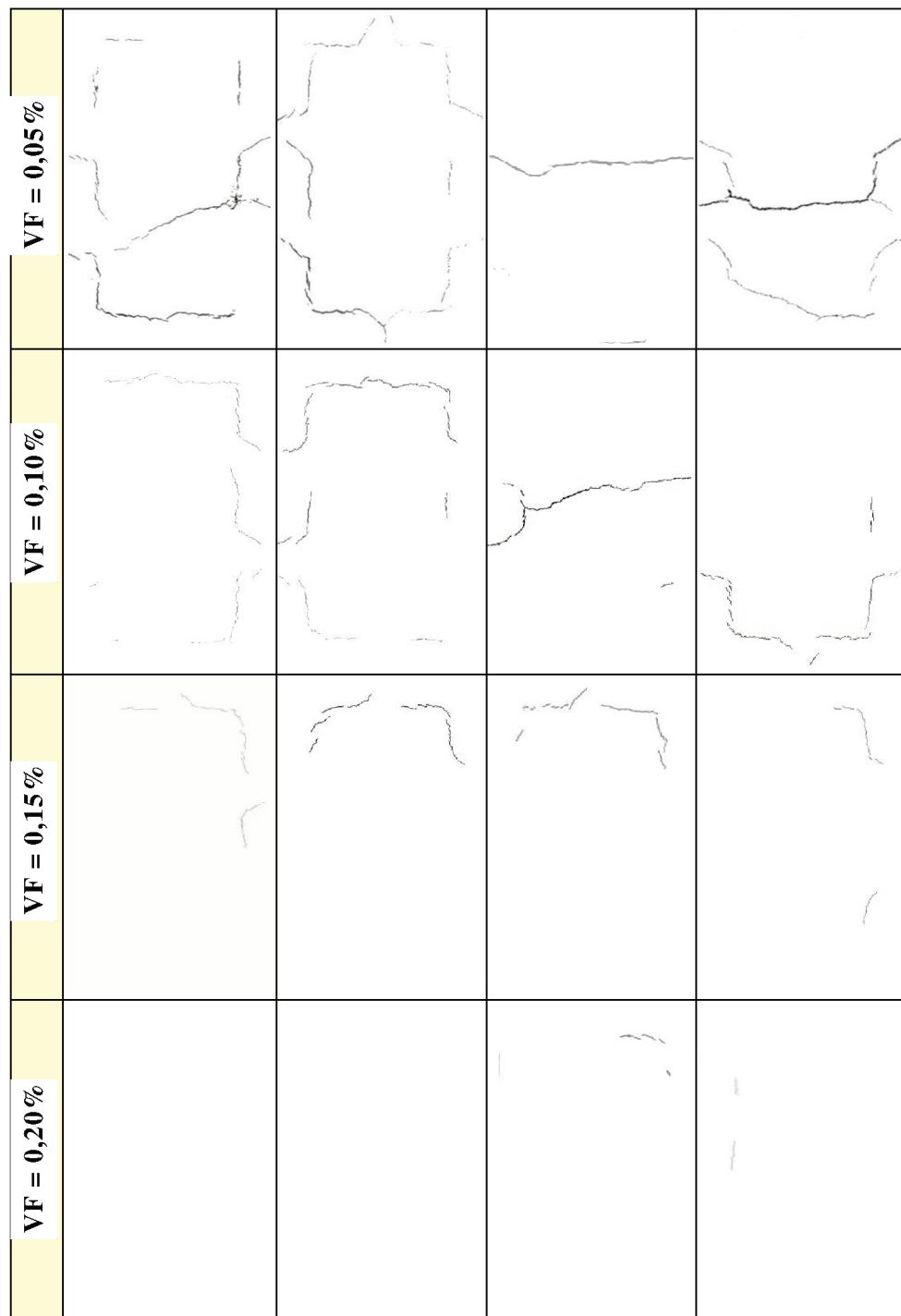
Já para o concreto com fibras de 12 mm (Figura 48), a distribuição para a proporção de 0,05% ocorreu de forma mais concentrada no centro da placa. Para as proporções de 0,10% e 0,15% foram mapeadas e acompanharam o sistema de restrição de forma mais acentuada. A redução da distribuição maior foi visualizada para 0,20%, visto que em duas das placas ensaiadas há apenas uma fissura central.

Figura 48 – Mapa de fissuração do concreto com fibras de 12 mm



Fonte: Autor (2018).

Os resultados visuais das fibras de 24 mm adicionadas ao concreto (Figura 49) confirmam os resultados quantitativos apresentados anteriormente. As fibras de polipropileno de 24 mm de comprimento atuaram no controle de fissuras, tanto no surgimento quanto na distribuição destas. Este fato pode ser notado nas imagens registradas das placas com proporções menores de 0,05% e 0,10% que apesar de apresentar fissuras distribuídas, estas estão em menor quantidade se comparadas com placas com a mesma proporção de fibras. Mas os melhores resultados são apresentados para as proporções de 0,15% e 0,20%. Para a proporção de 0,15% notam-se fissuras distribuídas na borda frontal (região mais perto da fonte de vento) apesar disto em pouca quantidade. E para a proporção de 0,20% fissuras de pequena abertura e pequena distribuição, praticamente inexistentes. O que comprova a eficiência deste tipo de fibra e desta proporção adicionada.

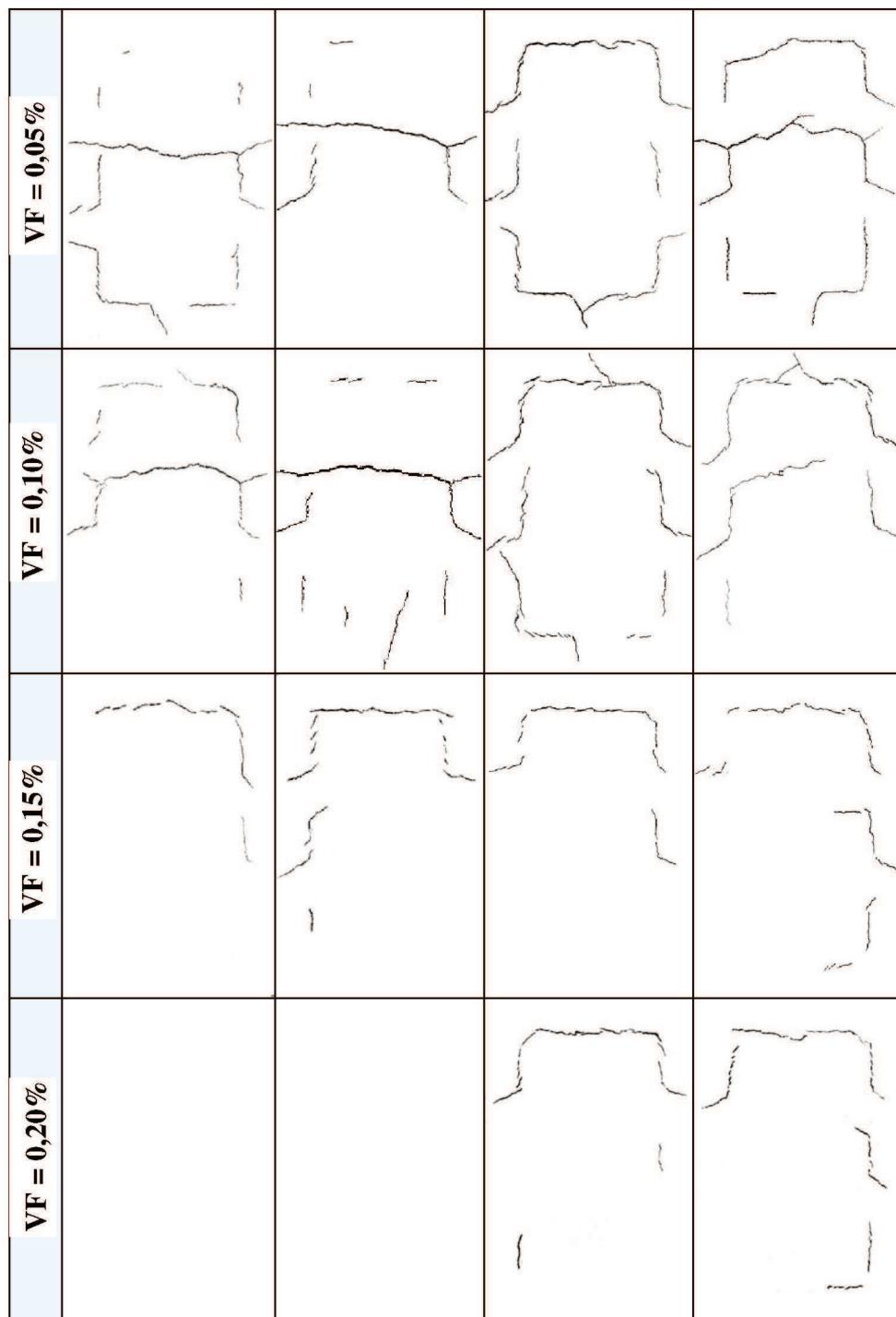
Figura 49 – Mapa de fissuração do concreto com fibras de 24 mm

Fonte: Autor (2018).

Para o caso das fibras de 10 mm (Figura 50), mesmo com um fator de forma maior e com resultados melhores em relação à área de fissuração e abertura de fissura em comparação com a fibra de 6 mm, a distribuição de fissuras para este caso ainda é significativa. Na maior parte das placas ensaiadas houve uma grande distribuição, seguindo o padrão de mapeamento citado para

o concreto sem fibras, mas também com fissuras menores espalhadas em outras direções, longitudinais e transversais. A redução desta distribuição começou a ser vista de forma mais significativa após o teor de volume de 0,15%.

Figura 50 – Mapa de fissuração - fibras de 10 mm



5.2 RESULTADOS PARA O CONCRETO NO ESTADO FRESCO – ANTES DA MOLDAGEM: MÉTODO DE ENSAIO ABNT NBR 15823-2: 2010

5.2.1 Análise do *slump flow* com a adição de fibras

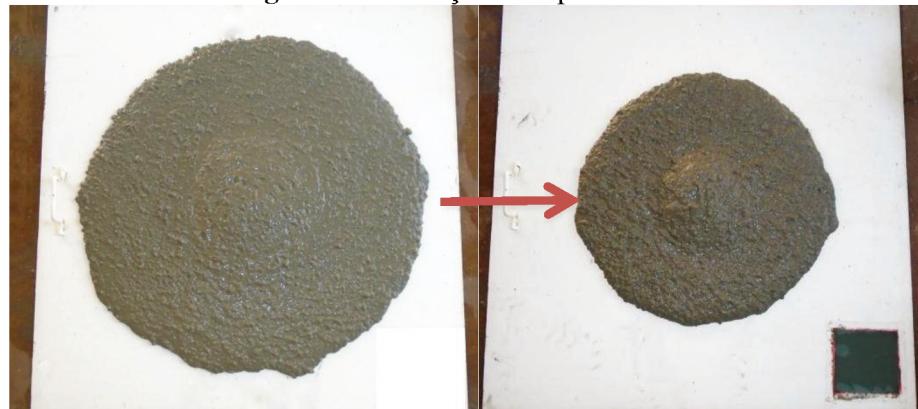
O foco principal desta pesquisa é avaliar a influência das microfibras no processo de retração hidráulica do concreto, mas não deixa de ser relevante a análise da influência da presença das fibras no estado fresco do concreto, antes da sua moldagem. Sobretudo por se tratar do concreto autoadensável que tem nas características do estado fresco as propriedades que qualificam este como autoadensável como sua boa trabalhabilidade. Desta forma, foram avaliados os resultados do ensaio realizado durante o estado fresco de acordo com a norma ABNT NBR 15823-2: 2010 - Concreto Autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams (Tabela 25).

Tabela 25 – Média de *slump flow*

Comprimento da fibra	Média de <i>Slump Flow</i> (cm)				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Referência	81,5				
6 mm		79,00	77,50	76,00	69,50
12 mm		73,00	71,00	69,00	67,00
24 mm		72,50	70,50	61,00	58,00
10 mm		75,50	76,00	66,50	63,50

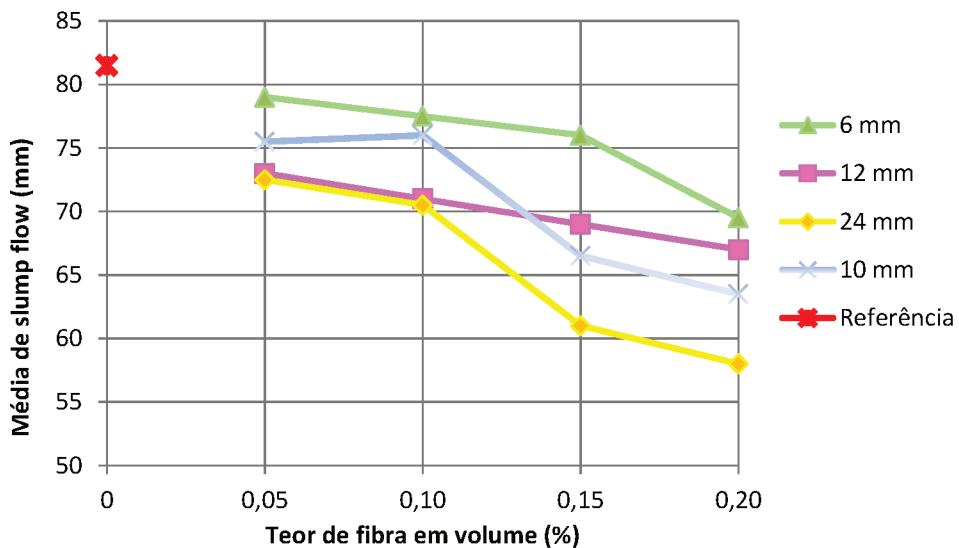
Fonte: Autor (2018).

Considerando os intervalos aceitáveis de *slump flow* dados pela EFNARC (2002) de 650 a 850 mm, apenas o menor valor de 58 cm para a fibra de 24 mm estaria fora deste intervalo, mas de acordo com a norma ABNT NBR 15823-2: 2010, que estabelece um intervalo maior que vai de 550 a 850 mm, mesmo com a adição de 0,20% de fibras de 24 mm (valor mais crítico dentre todos os resultados) ainda estaria dentro do intervalo aceitável. Apesar disso, nota-se especialmente pela Figura 51, que traz visualmente esta redução mencionada acima, a grande alteração que há na trabalhabilidade, ou seja, uma redução na fluidez e um aumento na sua viscosidade. Apesar disso não foi notada segregação do material, nem exsudação aparente. Apenas com a redução da fluidez, notou-se um acúmulo de material no centro durante o espalhamento.

Figura 51 – Redução do espalhamento

Fonte: Autor (2018).

Esta redução no espalhamento também pode ser vista pelo gráfico presente na Figura 52.

Figura 52 – Média de *slump flow* x Teor de fibra

Fonte: Autor (2018).

Pelo gráfico nota-se que a maior redução foi descrita com a variação de 0,10% para 0,15%, considerando o concreto com fibras de 24 mm é aquele que possui as maiores redução de trabalhabilidade. Ou seja, a partir de 0,10% a queda da trabalhabilidade é mais significativa e se ameniza levemente após o valor de 0,15%.

Esta maior redução encontrada para a fibra de 24 mm é citada no trabalho de Bentur e Mindess (2007) que diz que há uma contradição entre a geometria da fibra para possibilitar

maior trabalhabilidade ao concreto e a geometria requerida para uma máxima eficiência para o concreto endurecido. O que é explicado pelo fato de que longas fibras serão mais eficientes para promover melhora das propriedades do concreto endurecido, mas como esperado fazem com que o concreto fresco tenha sua trabalhabilidade reduzida. Fato este que pode ser compensado com alterações na composição do material.

5.3 PROPRIEDADES CARACTERÍSTICAS

5.3.1 Resultado do ensaio de resistência à compressão do concreto sem fibras

Com o objetivo de caracterizar o concreto produzido e tendo em vista que a propriedade de resistência à compressão é mais requerida deste tipo de material, 4 amostras de concreto sem fibras foram moldadas, curadas e ensaiadas como descrito anteriormente. Os resultados são apresentados na forma de Tabela 26.

Tabela 26 – Média de resistência à compressão para o concreto sem fibras

Tipo de concreto	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)					Desvio Padrão	Coeficiente de variação
	CP1	CP2	CP3	CP4	Média		
Sem fibras	30,17	33,82	35,13	27,99	32	3,28	0,10

Fonte: Autor (2018).

Considerando que para a produção deste concreto foi utilizada uma alta taxa de consumo de cimento e considerando que CPV – ARI era o tipo de cimento utilizado, esperava-se um aumento na resistência à compressão, mas em virtude de se utilizar também uma alta relação água/cimento o valor da resistência à compressão foi compensado. Com este valor médio característico, de acordo com a norma ABNT NBR 8953:1992 – Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência, este concreto seria classificado como do grupo I de resistência, classe C30, concreto para fim estrutural.

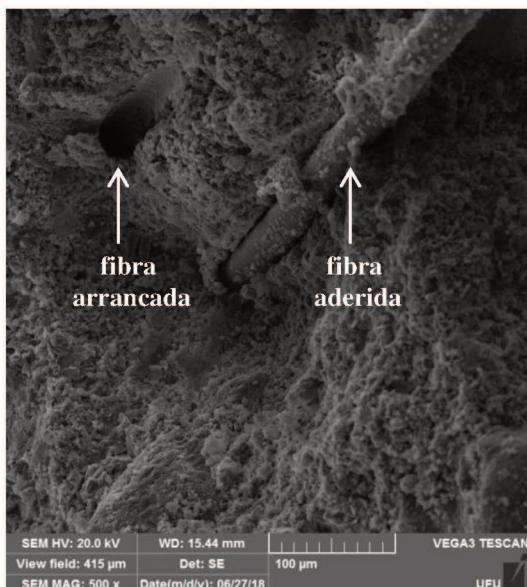
5.3.2 Análise microscópica das fibras dentro do compósito

Para fins de análise e identificação visual das fibras dentro do concreto cinco amostras de concreto com fibras foram submetidas à investigação pelo MEV (Microscopia eletrônica de varredura) na máquina VEGA3 (TESCAN). Análise esta realizada pela colaboração do Laboratório de Multusuários do Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade

Federal de Uberlândia. As amostras foram retiradas dos painéis produzidos com fibras de 24 mm e 10 mm.

Nas Figuras de 53 a 60 é possível observar produtos de hidratação da matriz ligados à fibra de polipropileno o que indica a boa aderência da mesma apesar da fibra de polipropileno ter naturalmente características hidrofóbicas. Em determinadas amostras há a presença de microfissuras na superfície, inicialmente abertas, e que dependendo das condições ambientais e da eficiência das fibras utilizadas, podem evoluir e continuar a abrir ou estabilizar o processo. Além disso, é possível identificar algumas modificações que ocorrem na superfície da fibra.

Figura 53 – Amostra com fibra de 10 mm com 0,10%



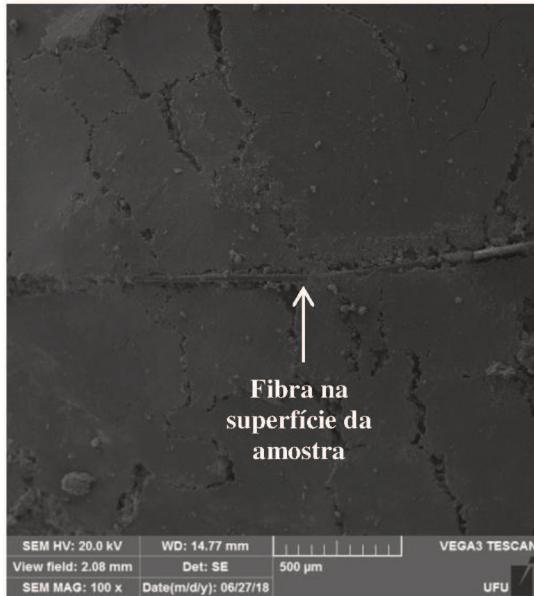
Fonte: Autor (2018).

Figura 54 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,05%



Fonte: Autor (2018).

Figura 55 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,05%



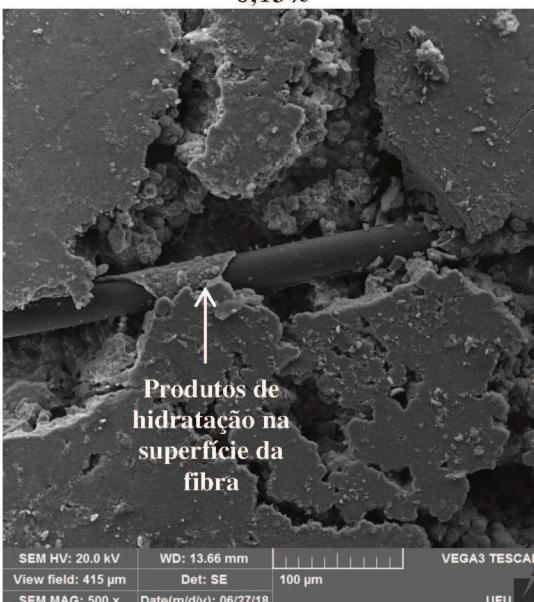
Fonte: Autor (2018).

Figura 57 - Amostra com fibra de 20 mm com 0,10%



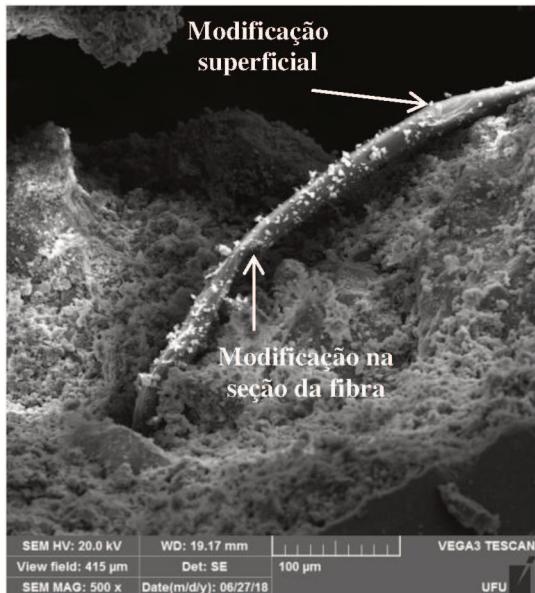
Fonte: Autor (2018).

Figura 56 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,15%



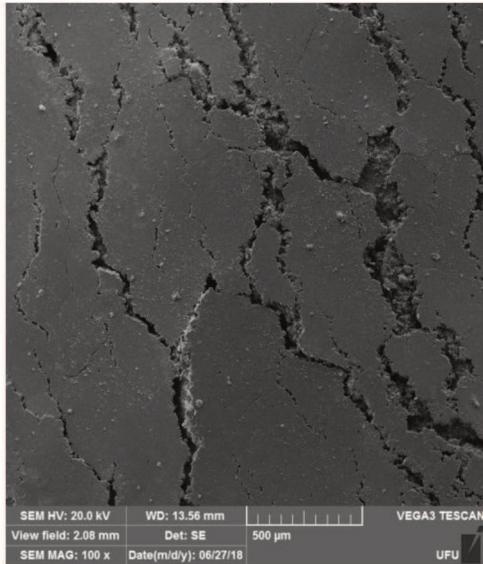
Fonte: Autor (2018).

Figura 58 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,10%



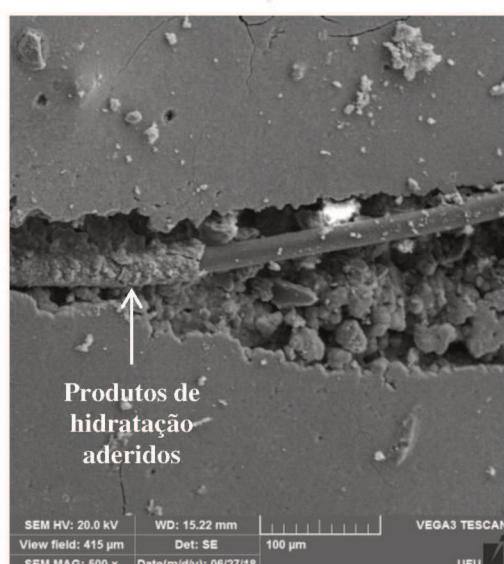
Fonte: Autor (2018).

Figura 59 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,05%



Fonte: Autor (2018).

Figura 60 – Amostra com fibra de 20 mm com 0,20%



Fonte: Autor (2018).

CONCLUSÃO

Observou-se que o concreto autoadensável reforçado com fibras é capaz de minimizar os efeitos de duas características do concreto opostas entre si: a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras (CRF) e a resistência à fissuração do concreto convencional (CC). Mesmo possuindo fatores de forma diferentes, todos os tipos de fibras apresentadas neste trabalho se mostraram eficientes para controlar a fissuração causada pela retração hidráulica no concreto autoadensável de forma geral. Ocasionaram certa redução na trabalhabilidade em comparação ao concreto sem fibras, mas por já apresentar trabalhabilidade superior ao concreto convencional, esta foi compensada. Mas quanto às recomendações normativas da ABNT NBR 6118: 2003, que regulamenta uma abertura de fissura considerada aceitável para áreas urbanas menor ou igual a 0,3 mm, seriam aceitáveis apenas o concreto com adição de fibras de 24 mm com volume maior ou igual 0,10% e concreto com adição de fibras de 10 mm com volume maior ou igual 0,20%.

Quanto aos tipos de fibras utilizadas, os resultados foram similares ao encontrado na literatura mesmo os trabalhos encontrados se referenciando a utilização do concreto convencional com adição de fibras de polipropileno. Os melhores resultados foram encontrados para fibras mais longas (ou com maior fator de forma) quando o objetivo é controlar a fissuração por retração hidráulica. Isto pode ser observado, pois entre as fibras de mesmas propriedades físicas e mecânicas e de mesmo diâmetro equivalente, a de maior comprimento foi a que se mostrou mais eficiente. Foi notado que longas fibras reduzem a trabalhabilidade do concreto fresco, mas este fato não pode ser considerado como desvantagem pois pode ser compensado com uma dosagem diferente de materiais e uso de aditivo superplastificante.

Em relação aos teores adicionados, quanto maior foi o teor adicionado, maior o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensão e menor o surgimento ou desenvolvimento de fissuras. Desta forma, os melhores resultados, foram encontrados para adição de fibra em um teor de 0,20% chegando a uma eficiência de redução da área de fissuração de 99% combinando com a eficiência das fibras longas.

Por fim, quanto à escolha do método de ensaio experimental para avaliar o mecanismo de retração hidráulica, o modelo de teste sugerido pela ASTM C1579:2013 se mostrou capaz de realizar uma análise eficiente da influência da adição de fibras no concreto autoadensável, mesmo esta norma não sendo específica para este tipo de concreto. Isto foi possível com as modificações feitas pelo autor a partir de ensaios piloto e adequações no traço. Quanto à forma de análise dos resultados de ensaio, a norma recomenda apenas a análise da abertura de fissuras e cálculo da taxa de redução desta. Contudo, durante o desenvolvimento deste trabalho notou-se que seria mais adequado avaliar os resultados a partir de dados também de área de fissuração das placas e a análise do mapa de fissuração em que é possível observar a distribuição das fissuras.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a análise de fibras com as mesmas propriedades físicas e mecânicas com geometrias diferentes;
- Executar outros tipos de ensaio para verificar as propriedades reológicas do concreto autoadensável;
- Investigar o método experimental a partir da retração livre para o concreto autoadensável reforçado com fibras de polipropileno;
- Investigar a influência das propriedades físicas e mecânicas das fibras utilizadas para combater os efeitos da retração hidráulica do concreto autoadensável;
- Avaliar a influência da temperatura e do aditivo superplastificante na retração hidráulica do concreto autoadensável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARTHI, K.; ARUNACHALAM, K. Durability Studies on Fibre Reinforced Self Compacting Concrete with Sustainable Wastes. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, n. 1, p. 247-255, 2017.

ACCEPTANCE CRITERIA FOR CONCRETE WITH SYNTHETIC FIBERS. **AC 32**. ICC, Evaluation Service, 2013.

AÏTCIN, P. C; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. Integrated view of shrinkage deformation. **Concrete International**, p. 35-41, sept. 1997.

ALY, T.; SANJAYAN, J. G; COLLINS, F. Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. **Materials and Structures**, v. 8, n. 1, January, 2014.

ALMEIDA FILHO, F. M.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C. **Evaluation of the bond strength behavior between steel bars and High Strength Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete at early ages**, Tailor Made Concrete Structures, Ed.: Taylor & Francis Group, London, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C157/ C157M**: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-cement Mortar and Concrete, 2014, 7 p.

_____. **ASTM C1579**: Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert), 2013, 7 p.

_____. **ASTM C1581// C1581M**: Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage, 2009, 7 p.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

ASLANI, F.; NEJADI, S. Creep and shrinkage of self-compacting concrete with and without fibers, **Journal of Advanced Concrete Technology**, n. 1, v. 11, p. 251-265, 2013.
<https://doi.org/10.3151/jact.11.251>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto Autoadensável: Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco, 11 p., 2010.

_____. **NBR 15823-2**: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams, 4 p., 2010.

_____. **NBR 5738**: Concreto: Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova, 9 p., 2015.

- _____. **NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, 221 p., 2003.
- _____. **NBR 7217:** Agregados - Determinação da composição granulométrica, 3 p., 1987.
- _____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência, 2 p., 1992.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **UNE-EN 14889-2:** Fibras para hormigón. Parte 2: Fibras poliméricas, definiciones, especificaciones y conformidad, 24 p., 2008.
- ASOCIACIÓN MERCOSUR DE NORMALIZACIÓN. **NM 67:** Hormigón - Determinación de la consistência mediante el asentamiento del tronco de cono, 11 p., 1996.
- BAGHERZADEH, R.; FARAMARZI, A. R.; GORJI, M. Utilizing Polypropylene Fibers to Improving Concrete Durability and Cracking Level. **Special Concretes and Quality Assurance**, Iran, v. 1, n. 1, p. 1-7, 2009.
- BAKHSI, M.; SORANAKOM, C.; MOBASHER, B. Characterization of plastic Shrinkage Parameters for Fresh Alkali Resistant Glass Fiber Reinforced Concrete. **Material Science and Technology**, Conference (MS&T 08), Pittsburgh, PA, 2008.
- BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas.** Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- BANTHIA, N.; BINDIGANAVILE, V.; JONES, J.; NOVAK, J. Fiber-reinforced concrete in precast concrete applications: Research leads to innovative products. **PCI Journal**, v. 57, n. 3, p. 33-46, June 2012. <https://doi.org/10.15554/pcij.06012012.33.46>
- BANTHIA, N.; GUPTA, R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 1, p. 1263-1267, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.01.010>
- BANTHIA, N.; YAN, C.; MINDESS, S. Restrained shrinkage cracking in fiber reinforced concrete: a novel test technique. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 9-14, 1996. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00186-7)
- BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 1, p. 1624-1638, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.019>
- BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento.** Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001.
- BENTUR, A.; KOVLER, K. Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems. **Materials and Structures**, v. 36, n. 3, p. 183-190, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02479556>

- BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**, Editora: Taylor & Francis, 2^a Ed. New York, 2007.
- BRANDÃO, A. M. da S. **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado - aspectos relativos ao projeto** -. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1998.
- CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Editora LTC, 7^a ed. Rio de Janeiro, 2008.
- CASAGRANDE, E. Q. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de polipropileno e com adição de cinza volante: Estudo do desempenho em pavimentos de concreto**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- COELHO, M. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e retração em concretos com elevadores teores de escória alto-forno**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2002.
- DELLINGHAUSEN, L de M. **Retração total e penetração de cloretos em concretos com cimento Portland branco e escória de alto forno**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- DOBBIN JUNIOR, E. S.; ROCHA, L. F. S. **Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle da fissuração**. Monografia – Universidade da Amazônia, Belém, 2011.
- DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 197–208, 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003>
- ELATY, M. A. A. A.; GHAZY, M. F. Fluidity evaluation of fiber reinforced-self compacting concrete based on buoyancy law. **HBRC Journal**, 2017.
- EL-KHOURY, R. D. **Creep and shrinkage behavior of self-consolidating concrete**. Dissertation– New Brunswick Rutgers, The State University of New Jersey. New Jersey, October 2010.
- EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. **EFNARC: Specification and guidelines for self-compacting concrete. Fevereiro, 2002.**
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2000.
- FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras**. Capítulo 37. Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), janeiro, 2011.
- FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A. Concreto com fibras de polipropileno (CFP). **Revista Téchne**, Edição 66, Setembro, 2002.

GIOVANNETTI, E. **Princípios básicos sobre concreto fluido.** 1^a ed. Editora: PINI. São Paulo, 1989.

GIROTTI, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto autoadensável.** Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2012.

GOMES, C. E. M. **Propriedades da pasta de cimento Portland com adições de copolímero Va/VeOva e Fibras de Poliamida – Estudo da interface Fibra-Matriz.** Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. <https://doi.org/10.11606/T.88.2005.tde-20102005-085923>

GONÇALVES, E. A. B. **Estudo das patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações.** UFRJ (Escola politécnica), 156 p., Rio de Janeiro, 2015.

GRDIC, Z. J. *et al.* Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1129–1133, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029>

INDIAN STANDARD. **IS 1199:** Methods of sampling and analysis of concrete, 1959, 49 p.

KAKOOEI, S.; AKIL, H. M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. **Construction and Building Materials**, UK, v. 27, n. 1, p. 73-77, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.015>

KRAAI, P. B. **A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete.** San Jose State University, 1985.

KUMAR, R.; GOEL, P.; MATHUR, R. Suitability of Concrete Reinforced with Synthetic Fiber for the Construction of Pavements, **Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies**, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan, 2013.

KUMAR, S. M.; KIRTI, C.; KUMAR, S. A.; ARORA, T. R.. Experimental Study of Light Weight Concrete Using PP Fiber. **International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology**, v. 3, n. 2, p. 90-05, February 2015.

KWAK; HYO-GYOUNG, H.; SOOJUN. Determination of Plastic Settlement of Mortar Using Non-contact Laser Measurement Device. **Journal of The Korean Society of Civil Engineers**, v. 28, n. 4A, p. 549-564, 2008

LI, Y.; MAI, Y.; YE, L. Sisal fiber and its composites: a review of recent developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 1, p. 2037-2055, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00101-9)

LIU, M. Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1245–1252, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.012>

- LOPES, E. S. **Os efeitos da vibração na saúde do trabalhador.** Disponível em: <http://www.mundohusqvarna.com.br/coluna/os-efeitos-da-vibracao-na-saude-do-trabalhador/>. Acesso: 02 set. 2017.
- LOSER, R.; LEEMANN, A. Shrinkage and restrained shrinkage cracking of self-compacting concrete compared to conventionally vibrated concrete. **Materials and Structures**, v. 42, n. 1, p. 71–82, 2009. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9367-9>
- MALLICK, P. K. **Composites engineering handbook.** New York, 1997. <https://doi.org/10.1201/9781482277739>
- MANUAL TÉCNICO MACCAFERRI. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto.** [S.L.] [S.A.]
- MANUAL TÉCNICO MC-BAUCHEMIE. **MC-PowerFlow 1180.** [S. L.], 2015.
- MELO NETO, A. A.; CINCOTTO, M. A.; FIGUEIREDO, A. D.; REPETTE, W. L. **Retração restrinida e fluência por tração: desenvolvimento de equipamento e metodologia.** Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2008.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** Instituto Brasileiro do Concreto. 2ª Edição. São Paulo, 2014.
- MELIÁN, G.; BARLUENGA, G.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Toughness increase of self-compacting concrete reinforced with polypropylene short fibers. **Construction materials**, Spain, v. 60, n. 300, p. 83-97, oct./dez. 2010.
- MORA-RUACHO, J.; GETTU, R.; AGUADO, A. Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 1, p. 141-146, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.011>
- NAAMAN, A. E.; WONGTANAKITCHAROEN, T.; HAUSER, G. Influence of Different Fibers on Plastic Shrinkage Cracking of Concrete, **ACI Materials Journal**, v. 102, n. 1, January-February, 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Editora: Pini, 5ª ed. São Paulo, 2015.
- NGUYEN, D. H.; DAO, V. T. N.; O'MOORE, L.; DUX, P. **Effects of micro-fibres on early-age properties of concrete.** Conference: The 2nd International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015), p. 1555-1564, Brisbane, Australia, 2015.
- NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland.** Boletim Técnico. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.
- NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e Propriedades.** Universidade do porto, Faculdade de Engenharia (FEUP), Portugal, 2001.

- OKAMURA, H; OUCHI, M. **Self-Compacting Concrete, Development, Present Use and Future.** First International Rilem Symposium on self-compacting concrete, p. 3-14, Sweden, 1999.
- OLIVEIRA, A. M. **Fluência a altas temperaturas, aderência fibra-matriz e comportamento mecânico sob ações higrotérmicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- PELISSE, F.; BARROS NETO, A.; LA ROVERE, H.; PINTO, R. C. Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. **Construction and building materials**, v. 24, n. 1, p. 2171-2176, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.041>
- PERRONE, V. C.; BARCELOS, M.; ALMINHANA, G.; SILVA FILHO, L. C. P. da. **Avaliação da influência do teor de agregados no desempenho em flexão de compósitos tipo SHCC.** Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Maceió, Alagoas, 2012.
- PIANCASTELLI, E. M. **Patologias do concreto.** Aecweb. Disponível em:
https://www.aecweb.com.br/cont/m/rev/patologias-do-concreto_6160_10_0. Acesso em: 15 jan. 2018.
- QI, C.; WEISS, J.; OLEK, J. **Assesing the Settlement of Fresh Concrete Using a Non-Contact Laser Profiling Approach.** International Conference on Construction Materials: ConMat'05. Vancouver, Canada, 2005.
- RAHMANI, T.; KIANI, B.; BAKHSI, M.; SHEKARCHIZADEH, M. Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete, **7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements**, p. 635-642, 2012. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4566-7_62
- RAMOS, M. F. **Análise Experimental de tubos de concreto reforçado com fibras de aço.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, 2002.
- ROCHA, I. Corrosão em estruturas de concreto armado. **Revista Especialize Online IPOG**, v. 1, n. 10, 26 p., 2015.
- RODRIGUES, P. P. F.; MONTARDO, J. P. **A influência da adição de fibras de polipropileno nas propriedades dos concretos para pisos e pavimentos.** 44º Congresso Brasileiro do concreto, 2002.
- SANCHES JÚNIOR, F. **Cálculo de esforços e deslocamentos em pavimentos de edifícios considerando-se modelos próprios para o concreto armado.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, 1998.

SHOENBERGER, J. E.; TOM, J. G. **Polypropylene Fibers Research and In Portland Cement Development Service Concrete Pavements.** Report, Research and Development Service Concrete Pavement. Washington, 1992.

SOARES, R. V. **Estudo dos esforços oriundos de retração e variação de temperatura em estruturas de concreto armado.** Boletim Técnico do Departamento de Engenharia Civil, PUC. Rio de Janeiro, 2015.

STEIN, K. J. **Analise da regeneração por ciclos de molhagem e secagem do compósito cimentício de alta ductilidade reforçado com fibras de polipropileno.** Evento de iniciação científica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 2012.

SWENSON, E. G.; SEREDA, P. J. Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. **Journal of Applied Chemistry**, v. 18, n. 4, p. 111-1117, 1968.
<https://doi.org/10.1002/jctb.5010180404>

TAVARES, L. R. C. **Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da UFMG, 2008.

TIA, M.; SUBRAMANIAN, R.; BROWN, D.; BROWARD, C. **Evaluation of Shrinkage Cracking potential of concrete used in bridge decks in Florida.** Report, Department of Civil & Coastal engineering, College of engineering, University of Florida Gainesville, Florida, January 2005.

TURCRY, P.; LOUKILI, A.; HAIDAR, K.; PIJAUDIER-CABOT, G.; BELARBI , A. Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling, **Journal os Materials in civil Engineering**, n. 1, v. 18, p. 46-54, 2006.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável.** Editora PINI. 1^a Edição. São Paulo, 2008.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based standard specifications for Maintenance and Repair of Concrete structures in Japan. **Structural Engineering International**, v. 4, p. 359-366, 2007. <https://doi.org/10.2749/101686607782359119>

VEIGA, M. R. S.; SOUZA, R. H. F. **Metodologia de avaliação da retracção livre das argamassas desde a sua moldagem.** Universidade do Minho, Escola de Engenharia, n. 20, p. 45-56, Portugal, 2004.

WATANABE, P. S. **Concretos especiais – propriedades, materiais e aplicações.** Faculdade de Engenharia Civil. UNESP, Campo de BAURU/SP. Fevereiro, 2008.

YADEGARAN, I.; MAHOUTIAN, M.; SHEKARCHI, M.; LIBRE, N. A. **Effect of polypropylene fibers on shrinkage of self-compacting concrete,** 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Septembre, Ghent, Belgium, 2007.

YEHIA, S.; DOUBA, A.; ABDULLAHI, O.; FARRAG, S. Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 121, n. 1, p. 120-133, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.127>

APÊNDICE A

DESENVOLVIMENTO DO TRAÇO UTILIZADO

Como este estudo sobre a retração do concreto autoadensável reforçado com fibras foi realizado em parceria com o pesquisador Jonatha Roberto, o traço inicial e os materiais a serem utilizados foram baseados no trabalho do pesquisador, sendo o traço em massa de 1:1,28: 1,45: 1,05: 0,45 (cimento: pó de pedra: areia fina: brita 0: a/c) e 1% de aditivo.

Inicialmente, como não se conhecia a diferença entre os materiais de Campinas e de Uberlândia, especialmente em relação ao pó de pedra e a areia fina, foi necessário avaliar a diferença entre a composição granulométrica dos agregados miúdos da região de São Paulo e do Triângulo Mineiro. Especialmente porque os materiais finos são os que mais influenciam nas propriedades do concreto autoadensável.

Desta forma, foi feita a análise granulométrica de amostras de pó de pedra e areia fina vindas de Campinas. Quanto aos materiais disponíveis em Uberlândia, encontrou-se a areia fina de dois tipos diferentes: areia rosa e areia fina comum. A areia rosa (Figura A1) é bastante conhecida na região para uso em concreto autoadensável pela característica de baixo módulo de finura. Então, além da análise granulométrica do pó de pedra e da areia fina também foi realizada a análise da areia rosa. Estes ensaios foram realizados de acordo com a ABNT NBR 7217:1987.

Figura A1 – Areia rosa da região de Uberlândia



Fonte: Autor (2017).

A.1 Granulometria dos agregados miúdos de Campinas

Quanto ao ensaio de granulometria dos materiais de Campinas, os resultados são apresentados nas Tabelas A1e A2. Com estes resultados e com os valores determinados para o traço inicial desenvolvido pelo pesquisador de Campinas, foi possível estabelecer uma relação de proporção de cada agregado miúdo na composição do concreto que será explicada a seguir.

Tabela A1 - Composição granulométrica da areia fina da região de Campinas

Agregado miúdo - Areia fina			
Abertura da peneira mm (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0	0	0
6,35 (1/4)	0	0	0
4,76 (4)	0	0	0
2,36 (8)	0	0	0
1,18 (16)	0	0	0
0,59 (30)	14,117	4,706	4,706
0,30 (50)	79,517	26,506	31,211
0,15 (100)	159,217	53,072	84,284
0,09 (170)	28,217	9,406	93,689
0,07 (200)	7,217	2,406	96,095
Fundo	11,717	3,906	100,001
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A2- Composição granulométrica do pó de pedra da região de Campinas

Agregado miúdo - Pó de pedra			
Abertura da peneira mm (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0	0	0
6,35 (1/4)	1,8	0	0
4,76 (4)	9,2	1,314	1,314
2,36 (8)	161,5	23,071	24,386
1,18 (16)	142,2	20,314	44,700
0,59 (30)	140,4	20,057	64,757
0,30 (50)	86,4	12,343	77,100
0,15 (100)	72,9	10,414	87,514
0,09 (170)	51,4	7,343	94,857
0,07 (200)	7,5	1,071	95,929
Fundo	21,2	3,029	98,957
Total	700g		

Fonte: Autor (2017).

No traço inicial a proporção de pó de pedra e areia fina em relação ao cimento era de 1,28 e 1,45 respectivamente. Somando estes valores, os agregados miúdos representam no traço um valor de 2,73. E assim, fazendo uma relação entre este valor e valor individual de cada um dos materiais observa-se que há uma proporção de 52% de areia fina e 48% de pó de pedra. Com cada uma destas porcentagens, as proporções foram distribuídas na composição granulométrica e obteve-se uma composição geral dos agregados miúdos representada na Tabela A3.

Tabela A3 - Composição granulométrica com 52% de areia fina e 48% de pó de pedra da região de Campinas

Combinação: 52% de areia fina e 48% de pó de pedra			
Abertura da peneira mm (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0	0	0
6,35 (1/4)	0,00	0	0
4,76 (4)	0,46	0	0
2,36 (8)	25,91	0	0
1,18 (16)	24,88	8,294	8,294
0,59 (30)	41,11	13,703	21,997
0,30 (50)	60,92	20,308	42,305
0,15 (100)	100,37	33,457	75,763
0,09 (170)	24,37	8,125	83,887
0,07 (200)	7,06	2,352	86,239
Fundo	14,91	4,970	91,209
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

A.2 Granulometria dos agregados miúdos de Uberlândia

Depois de efetuar a análise e composição dos agregados miúdos de Campinas, foram feitas as análises dos agregados de Uberlândia. Os resultados para a areia rosa, areia fina e pó de pedra são apresentados nas Tabelas A4, A5 e A6 respectivamente. Desta forma, foram feitas combinações com estes materiais para saber qual seria a melhor proporção, ou seja, a proporção mais próxima da composição granulométrica do traço com os materiais de Campinas.

Tabela A4 - Composição granulométrica da areia rosa da região de Uberlândia
Agregado miúdo - Areia rosa

Abertura da peneira Mm/ (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0	0	0
6,35 (1/4)	0	0	0
4,76 (4)	0	0	0
2,36 (8)	0	0	0
1,18 (16)	0	0	0
0,59 (30) 600 µm	21,07	7,023	7,023
0,30 (50) 300 µm	236,57	78,857	85,880
0,15 (100)	42,37	14,123	100,000
0,09 (170)	0	0	100,000
0,07 (200)	0	0	100,000
Fundo	0	0	100,000
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A5 - Composição granulométrica da areia fina da região de Uberlândia
Agregado miúdo - Areia fina

Abertura da peneira mm (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0	0	0
6,35 (1/4)	0	0	0
4,76 (4)	0	0	0
2,36 (8)	0	0	0
1,18 (16)	0,19	0,064	0,064
0,59 (30)	3,50	1,168	1,232
0,30 (50)	142,43	47,478	48,710
0,15 (100)	128,74	42,914	91,624
0,09 (170)	23,86	7,954	99,578
0,07 (200)	0,46	0,154	99,732
Fundo	0,80	0,268	100,000
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A6 - Composição granulométrica do pó de pedra da região de Uberlândia
Agregado miúdo – Pó de pedra

Abertura da peneira mm (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0	0	0
6,35 (1/4)	0	0	0
4,76 (4)	2,661	0,380	0,380
2,36 (8)	128,211	18,316	18,696
1,18 (16)	162,611	23,230	41,926
0,59 (30)	156,761	22,394	64,321
0,30 (50)	94,041	13,434	77,755
0,15 (100)	42,501	6,072	83,827
0,09 (170)	37,411	5,344	89,171
0,07 (200)	7,811	1,116	90,287
Fundo	65,991	9,427	100,000
Total	700g		

Fonte: Autor (2017).

A primeira combinação foi feita com a mesma proporção do traço de Campinas de 52% e 48% com areia rosa e pó de pedra respectivamente. E também para 52% de areia fina e 48% de pó de pedra. Estes dois resultados foram comparados e observou-se que a combinação de areia fina com o pó de pedra apresentava valores mais adequados, pois sua composição granulométrica era mais distribuída e mais similar a Campinas. Por fim foram feitos então mais três combinações com os materiais pó de pedra e areia fina, sendo elas 48% de areia fina e 52% de pó de pedra, 45% de areia fina e 55% de pó de pedra e 55% de areia fina e 45% de pó de pedra.

Todas estas combinações foram analisadas quanto aos fatores comentados anteriormente, e apresentadas como Tabelas de A7 a A12, e por fim observou-se que a melhor composição seria a de 48% de areia fina e 52% de pó de pedra.

Tabela A7 - Composição granulométrica com 52% da areia rosa e 48% do pó de pedra da região de Uberlândia

Combinação: 52% areia rosa e 48% de pó de pedra			
Abertura da peneira	Massa retida	% retida	% retida acumulada
mm (malha)	(g)		
9,52 (3/8)	0,00	0	0
6,35 (1/4)	0,00	0	0
4,76 (4)	0,46	0,15	0,15
2,36 (8)	25,91	8,64	8,79
1,18 (16)	24,88	8,29	17,09
0,59 (30)	44,73	14,91	31,99
0,30 (50)	142,59	47,53	79,52
0,15 (100)	39,61	13,20	92,73
0,09 (170)	9,70	3,23	95,96
0,07 (200)	3,30	1,10	97,06
Fundo	8,82	2,94	100,00
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A8- Composição granulométrica com 52% da areia fina e 48% do pó de pedra da região de Uberlândia

Combinação: 52% de areia fina e 48% de pó de pedra			
Abertura da peneira	Massa retida	% retida	% retida acumulada
mm (malha)	(g)		
9,52 (3/8)	0,00	0,0	0
6,35 (1/4)	0,00	0,0	0
4,76 (4)	0,59	0,2	0,2
2,36 (8)	26,42	8,8	9,004
1,18 (16)	33,60	11,2	20,204
0,59 (30)	34,12	11,4	31,575
0,30 (50)	93,46	31,2	62,727
0,15 (100)	75,73	25,2	87,972
0,09 (170)	20,15	6,7	94,689
0,07 (200)	1,89	0,6	95,320
Fundo	14,04	4,7	100,000
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A9 - Composição granulométrica com 55% da areia fina e 45% do pó de pedra da região de Uberlândia

Combinação: 55% de areia fina e 45% de pó de pedra			
Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52	0,00	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	0,00
4,76	0,56	0,19	0,19
2,36	24,77	8,26	8,44
1,18	31,51	10,50	18,94
0,59	32,20	10,73	29,68
0,297	96,52	32,17	61,85
0,15	79,05	26,35	88,20
170	20,38	6,79	94,99
200	1,80	0,60	95,60
Fundo	13,21	4,40	100,00
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A10 - Composição granulométrica com 45% da areia fina e 55% do pó de pedra da região de Uberlândia

Combinação: 45% de areia fina e 55% de pó de pedra			
Abertura da peneira (mm)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52	0,00	0,00	0,00
6,3	0,00	0,00	0,00
4,76	0,64	0,21	0,21
2,36	28,62	9,54	9,75
1,18	36,38	12,13	21,88
0,59	36,56	12,19	34,07
0,297	85,10	28,37	62,43
0,15	67,46	22,49	84,92
170	19,13	6,38	91,29
200	2,00	0,67	91,96
Fundo	15,12	5,04	100,00
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A11- Composição granulométrica com 48% da areia fina e 52% do pó de pedra da região de Uberlândia

Combinação: 48% de areia fina e 52% de pó de pedra			
Abertura da peneira mm (malha)	Massa retida (g)	% retida	% retida acumulada
9,52 (3/8)	0,00	0,00	0,00
6,35 (1/4)	0,00	0,00	0,00
4,76 (4)	0,64	0,21	0,21
2,36 (8)	28,62	9,54	9,75
1,18 (16)	36,38	12,13	21,88
0,59 (30)	36,67	12,22	34,10
0,30 (50)	89,37	29,79	63,90
0,15 (100)	71,32	23,77	87,67
0,09 (170)	19,84	6,61	94,28
0,07 (200)	2,01	0,67	94,95
Fundo	15,14	5,05	100,00
Total	300g		

Fonte: Autor (2017).

Tabela A12 - Comparação da % retida da composição granulométrica com 48% da areia fina e 52% do pó de pedra da região de Uberlândia em relação à composição de Campinas

Comparação entre Campinas x Uberlândia		
Abertura da peneira mm (malha)	% retida Uberlândia	% retida Campinas (Referência)
9,52 (3/8)	0,00	0,00
6,35 (1/4)	0,00	0,00
4,76 (4)	0,21	0,00
2,36 (8)	9,54	0,00
1,18 (16)	12,13	8,29
0,59 (30)	12,22	13,70
0,30 (50)	29,79	20,31
0,15 (100)	23,77	33,46
0,09 (170)	6,61	8,13
0,07 (200)	0,67	2,35
Fundo	5,05	4,97
Total		

Fonte: Autor (2017).

Com esta proporção então foi feito o processo reverso para determinar o traço final. Na proporção inicial de 2,73 de agregados miúdos em relação ao cimento, 48% de areia fina e 52% de pó de pedra representariam então 1,42 para o pó de pedra e 1,31 para a areia fina. As proporções dos materiais restantes foram mantidas constantes e o traço foi definido como: 1: 1,42: 1,31: 1,05: 0,45 (cimento: pó de pedra: areia fina: brita 0: a/c) e 1% de aditivo.

A.4 Conclusão

Desta forma, foi concluído que as modificações realizadas no traço em massa seria de 1: 1,28: 1,45: 1,05: 0,45 e 1% de aditivo para 1: 1,42: 1,31: 1,05: 0,45 e 1% de aditivo.

APÊNDICE B

CORREÇÕES DO TRAÇO A PARTIR DE ENSAIOS PILOTO

B.1 Ensaio inicial para avaliação do traço

Foram feitos ensaios pilotos para verificar se o ajuste de granulometria com areia fina e pó de pedra seria eficiente para manter as características deste tipo de concreto. No primeiro ensaio piloto quanto às características do concreto fresco o mesmo apresentou um *slump flow* de 600 mm (Figura B1) o que foi condizente com o intervalo considerado para o CAA.

Figura B1 – Slump flow do concreto autoadensável com ajuste de traço



Fonte: Autor (2017).

B.2 Aumento da relação a/c=0,60, aumento da quantidade do consumo de cimento e redução do aditivo superplasticificante

Diante das mudanças realizadas na fôrma e na condição ambiente com o aumento da temperatura sem obter resultados satisfatórios para o objetivo da pesquisa, a decisão seguinte foi a alteração no traço do concreto com mudança nas proporções dos componentes que influenciam diretamente na retração hidráulica, como a quantidade de finos e a relação a/c, segundo estudos de Neville (2015). Notou-se também que a quantidade de aditivo possui grande influência na retração hidráulica, possivelmente devido a sua característica superplasticificante.

Foi feito um aumento do consumo de cimento de 495 kg/m³ para 600 kg/m³, um aumento do teor de água alterando a relação a/c (água/cimento) de 0,45 para 0,60 e, por fim, reduziu-se o

consumo de aditivo para a menor quantidade possível, a ser determinada experimentalmente. A menor quantidade possível de aditivo utilizada seria o suficiente para atingir as propriedades reológicas características do CAA. O valor de partida inicial para o mesmo foi de 0,1% em relação ao peso de cimento.

Quanto às características do concreto fresco o mesmo apresentou um *slump flow* de 680 mm com adição de 0,1% de aditivo o que foi condizente com o intervalo considerado para o CAA. Também foi possível observar que o material se manteve estável durante o teste, sem apresentar perda de homogeneidade e segregação por exemplo.

B.3 Alteração do valor da relação a/c = 0,68

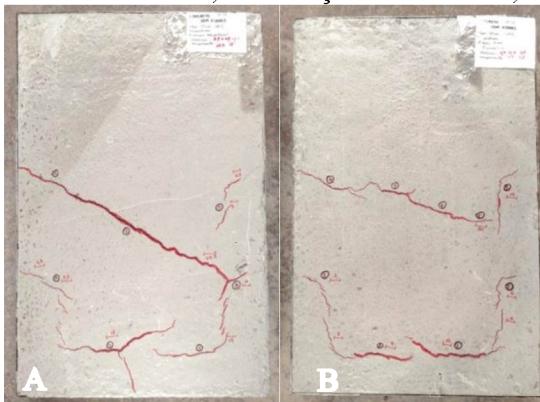
Como ainda havia a necessidade de encontrar um valor limite para a relação água/cimento, decidiu-se continuar a realização dos ensaios, agora adicionando água até o ponto em que o material se mantivesse estável o suficiente para manter as características requeridas do CAA como fluidez, habilidade passante e resistência à segregação. Este valor de relação a/c está acima do recomendado pela ABNT NBR 6118, que estabelece que este valor deve ser abaixo de 0,65. Apesar disto este valor foi adotado em função de tornar o material com uma concentração maior de água e maior influência na retração hidráulica e no processo de fissuração.

Para isto, foi feito um traço com as mesmas proporções anteriores dos materiais. Iniciando com uma relação a/c de 0,6 ainda sem a adição de aditivo, obteve-se como resultado um *flow* de 600 mm. Dando prosseguimento adicionou-se o aditivo (com a mesma proporção anterior de 0,1% em relação ao peso do cimento) e obteve-se um *flow* de 690 mm. Por último adicionou-se mais água para avaliar até que ponto o material se manteria estável durante o ensaio atingindo um valor de a/c igual a 0,68, com *flow* igual a 800 mm. O material se manteve adequado para as características requeridas do CAA.

Na amostra de concreto sem fibras, a fissura central apresentou abertura de 1,2 mm e comprimento total e linear de 35,5 cm, as outras fissuras distribuídas na superfície apresentaram abertura de 0,7 a 0,2 mm. Enquanto a fissura central existente no concreto com fibras de polipropileno (6 mm) apresentou abertura de 0,7 mm e comprimento de 30,0 cm e as

fissuras menores apresentaram abertura de 0,6 a 0,2 mm. Os resultados podem ser vistos na Figura B2.

Figura B2 – Amostras de CAA em a) sem adição de fibras e b) com adição de fibras



Fonte: Autor (2017).

B.4 Conclusão

Desta forma, foi concluído que as modificações realizadas no traço, em massa, seriam:

- Aumento da relação a/c de 0,45 para 0,68;
- Redução de 1% de aditivo para 0,1%;
- Aumento do consumo de cimento de 495 kg/m³ para 600 kg/m³.

O traço final definido foi de 1: 1,17 : 1,08 : 0,86 : 0,68 com 0,1% de aditivo em relação à massa de cimento.

APÊNDICE C

MODIFICAÇÕES PARA AJUSTE DO MÉTODO DE ENSAIO EXPERIMENTAL

C.1 Utilização da forma recomendada pela norma ASTM C1579:2013

Como é indicado pela norma, as fôrmas utilizadas a priori possuíam dimensões de 360 x 560 x 100 mm e apresentam sistema de indução de tensões em três pontos internos (Figura C1).

Figura C1 – Fôrmas para ensaio de retração



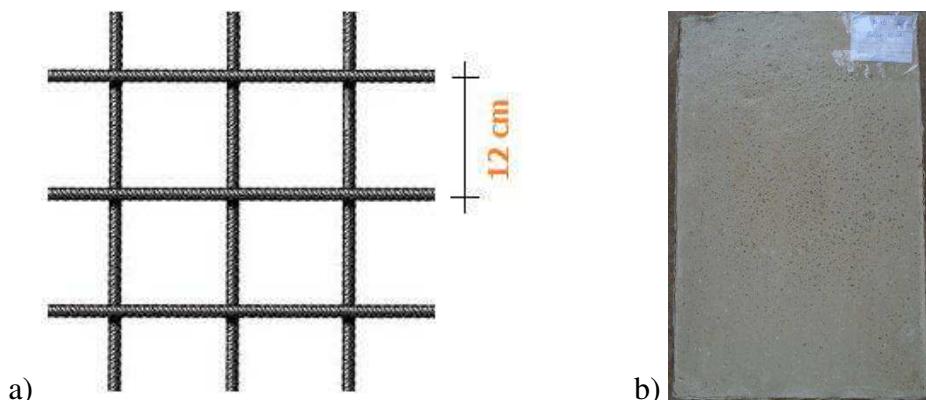
Fonte: Autor (2017).

Sob estas condições e utilizando os aparatos da norma supracitada, as amostras apresentaram abertura de fissura de forma localizada centralmente, com pouca dispersão. Já que mesmo sem a adição de fibras houve pouca abertura de fissuras, e tendo em vista que o objetivo deste trabalho era encontrar um método de execução que tornasse o sistema mais crítico possível, ou seja, com maior número de abertura de fissuras para que a partir deste ponto então fossem adicionadas as fibras e fosse possível avaliar a eficiência destas, optou-se por dar continuidade a avaliação das melhores condições de ensaio.

C.2 Teste com uso de barras de aço soldadas em formato de tela

O segundo teste foi optar por utilizar uma tela soldada de aço com barras de 8 mm espaçadas de 12 cm nas duas direções (Figura C2a). Mesmo com a troca de restrição interna e indução para um aumento de tensões, com o objetivo de obter uma maior abertura de fissuras e que as mesmas fossem maiores em quantidade e comprimento, não foi notada nenhuma modificação superficial (Figura C2b), o que tornou esse tipo de restrição descartado para a avaliação da retração hidráulica nesta pesquisa.

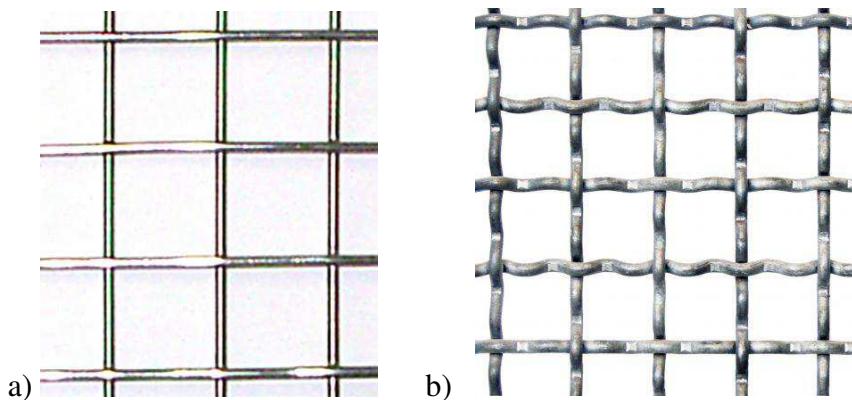
Figura C2 – a) Armação utilizada na forma da ASTM C1579 (2013) para restrição interna e b)
Amostra de concreto após o período de 24 horas de cura



Fonte: Autor (2017).

C.3 Teste com uso de outros tipos de tela com menor espessura a maior distribuição

A terceira opção foi utilizar uma tela com malha de 5 mm espaçadas de 10 cm nas duas direções (Figura C3a) e em outro teste utilizar tela com malha de 3,4 mm espaçadas de 2 cm (Figura C3b). Mesmo com a troca de restrição não foi notada nenhuma modificação superficial.

Figura C3 – a) Tela soldada e b) Tela ondulada

Fonte: a) Disponível em: <http://www.letelas.com.br/letelas-produtos/telas-soldadas/tela-soldada-9-33-36.html>. Acesso em 10 de mar. de 2018, b) Disponível em: <https://casaserralheiro.com.br/product/tela-quadrada-ondulada/>. Acesso em: 10 de mar. de 2018.

C.4 Alteração da restrição interna para peças metálicas ao perímetro, redução da altura da forma e avaliação a influência da temperatura

Como não o objetivo ainda não havia sido atingido decidiu-se alterar a altura da fôrma indicada por norma como 10 cm para 5 cm já que uma menor altura favoreceria o processo de evaporação da água e tornaria mais crítico o sistema de retração. Além disto, baseado no trabalho de Barluenga e Hernández (2007) foi feita a tentativa de implantar um sistema de restrição interna a partir da fixação de 10 peças metálicas em formato de “U” fixadas em todo o perímetro da forma distribuídas de forma equidistante entre si. Este esquema pode ser visto na Figura C4.

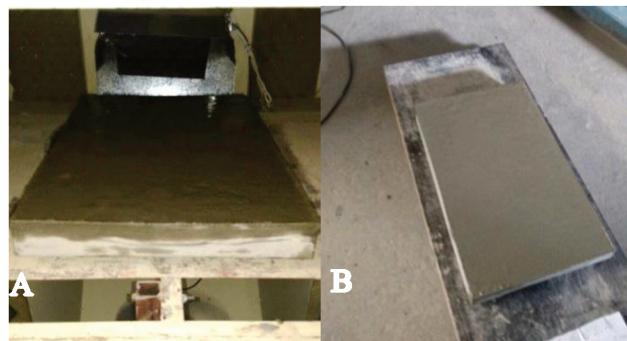
Figura C4 – Fôrma com sistema de restrição perimetral

Fonte: Autor (2017).

Para avaliar a influencia da temperatura no ensaio, foram produzidas duas amostras de concreto com as características citadas anteriormente, uma à temperatura ambiente de 24°C

com vento atuando a 2 m/s (Condição 1) e a outra também com um fluxo de vento de 2 m/s mas com uma temperatura de 44 °C (Condição 2). O desenvolvimento do teste de comparação entre as duas amostras pode ser visto na Figura C5.

Figura C5 – Amostras durante o ensaio em a) Condição 2 b) Condição 1



Fonte: Autor (2017).

Com estas alterações, depois de cinco horas de cura as duas amostras de concreto começaram a mostrar alterações superficiais com abertura de pequenas fissuras diagonais. Notou-se que a amostra de concreto que ficou sob temperatura ambiente de 24°C obteve uma abertura de fissura maior em relação à amostra sob temperatura constante de 44 °C.

C.5 Conclusão

Desta forma, foi concluído que as modificações realizadas na norma ASTM C1579:2013, seriam:

- A fôrma utilizada seria de 360 x 560 x 50 mm, altura reduzida de 100 mm para 50 mm;
- O sistema de restrição interna foi alterado de três pontos de indução recomendados pela norma para fixação de peças metálicas em todo o perímetro a 3 cm das bordas;
- A condição de temperatura condicionada ao experimento de $36 \pm 3^\circ\text{C}$ alterada para um valor de $25 \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa foi alterada de $30 \pm 10\%$ para $48 \pm 5\%$ em função das condições físicas existentes no local de ensaio.

ANEXO A

CRITÉRIO DE CHAUVENET PARA REJEIÇÃO DE VALORES MEDIDOS

Para aplicação deste método é calculada a média (x_{med}) e desvio padrão (σ) do conjunto de dados medidos, conforme Equação X. A partir do valor de cada valor medido (x_i) é calculado o valor do desvio Δx para cada um, conforme Equação X. Os resultados obtidos para Δx são comparados com o valor da razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão, conforme Tabela X, devendo ser rejeitados caso o desvio de cada um dos pontos seja superior aos apresentados, para a respectiva quantidade de dados medidos.

$$\text{Desvio padrão } (\sigma) = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Equação A1

$$\Delta_x = \frac{|x_i - x_{med}|}{\sigma}$$

Equação A2

Tabela X - Critério de Chauvenet para rejeição de valor medido

Dados Medidos N	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão	Dados Medidos N	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão
3	1,38	20	2,24
4	1,54	21	2,26
5	1,65	22	2,28
6	1,73	23	2,30
7	1,80	24	2,31
8	1,85	25	2,33
9	1,91	26	2,35
10	1,96	27	2,36
11	1,99	28	2,37
12	2,03	29	2,38
14	2,10	50	2,57
15	2,13	100	2,81
16	2,16	300	2,14
17	2,18	500	3,29
18	2,20	1000	3,48
19	2,22		

Fonte: Arif (2014).

APÊNDICE D

VALORES OBTIDOS NO CONCRETO FRESCO AUTOADENSÁVEL

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Slump's (cm)		Média (cm)
Concreto sem fibras - Referência	0%	83,00	80,00	81,50

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Slump Flow (cm) - Com fibras		Redução (Slump sem fibras - Slump com fibras)		Média redução	Média do Slump (cm)
6 mm	0,20%	66,00	73,00	17,00	9,00	13,00	69,50
6 mm	0,15%	73,00	79,00	5,00	11,00	10,00	76,00
6 mm	0,10%	77,00	78,00	3,00	7,00	5,00	77,50
6 mm	0,05%	79,00	79,00	3,00	6,00	4,50	79,00

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Slump Flow (cm) - Com fibras		Redução (Slump sem fibras - Slump com fibras)		Média redução	Média do Slump (cm)
12 mm	0,20%	69,00	65,00	20,00	15,00	17,50	67,00
12 mm	0,15%	73,00	65,00	9,00	15,00	12,00	69,00
12 mm	0,10%	72,00	70,00	12,00	11,00	11,50	71,00
12 mm	0,05%	69,00	77,00	16,00	6,00	11,00	73,00

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Slump Flow (cm) - Com fibras		Redução (Slump sem fibras - Slump com fibras)		Média redução	Média do Slump (cm)
24 mm	0,20%	60,00	56,00	26,00	22,00	24,00	58,00
24 mm	0,15%	63,00	59,00	22,00	19,00	20,50	61,00
24 mm	0,10%	70,00	71,00	14,00	13,00	13,50	70,50
24 mm	0,05%	75,00	70,00	8,00	17,00	12,50	72,50

Comprimento de fibra	Volume de fibra	Slump Flow (cm) - Com fibras		Redução (Slump sem fibras - Slump com fibras)		Média redução	Média do Slump (cm)
10 mm	0,20%	67,00	60,00	20,00	17,00	18,50	63,50
10 mm	0,15%	69,00	64,00	16,00	12,00	14,00	66,50
10 mm	0,10%	80,00	72,00	11,00	8,00	9,50	76,00
10 mm	0,05%	76,00	75,00	12,00	5,00	8,50	75,50

APÊNDICE E

APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE CHAUVENET

Comprimento de fibra	Volume de fibra	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	xmédio	Desvio padrão	Razão		Resultado (<1,54)	
Concreto sem fibras - Referência	0,00%	1317,00	862,50	1157,06	314,69	0,508	0,936	ACEITO	ACEITO
		928,00	1520,75			0,728	1,156	ACEITO	ACEITO

Comprimento de fibra	Volume de fibra	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	xmédio	Desvio padrão	Razão		Resultado (<1,54)	
6 mm	0,20%	405,00	247,00	328,25	66,21	1,159	1,227	ACEITO	ACEITO
		312,50	348,50			0,238	0,306	ACEITO	ACEITO
6 mm	0,15%	456,50	226,00	361,38	97,21	0,979	1,393	ACEITO	ACEITO
		372,50	390,50			0,114	0,300	ACEITO	ACEITO
6 mm	0,10%	415,00	334,00	554,99	213,37	0,656	1,036	ACEITO	ACEITO
		696,75	774,20			0,664	1,027	ACEITO	ACEITO
6 mm	0,05%	655,00	682,00	616,38	186,87	0,207	0,351	ACEITO	ACEITO
		348,00	780,50			1,436	0,878	ACEITO	ACEITO

Comprimento de fibra	Volume de fibra	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	xmédio	Desvio padrão	Razão		Resultado (<1,54)	
12 mm	0,20%	208,00	7,00	145,88	95,17	0,653	1,459	ACEITO	ACEITO
		161,00	207,50			0,159	0,648	ACEITO	ACEITO
12 mm	0,15%	112,50	322,00	316,00	147,77	1,377	0,041	ACEITO	ACEITO
		367,00	462,50			0,345	0,991	ACEITO	ACEITO
12 mm	0,10%	549,00	363,50	339,73	173,42	1,207	0,137	ACEITO	ACEITO
		319,90	126,50			0,114	1,230	ACEITO	ACEITO
12 mm	0,05%	390,00	403,00	343,00	73,13	0,643	0,820	ACEITO	ACEITO
		337,00	242,00			0,082	1,381	ACEITO	ACEITO

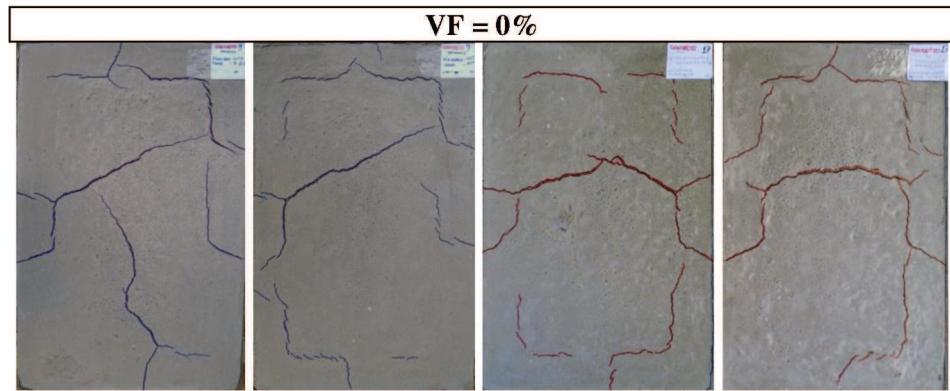
Comprimento de fibra	Volume de fibra	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	xmédio	Desvio padrão	Razão		Resultado (<1,54)	
24 mm	0,20%	0,00	0,00	2,69	3,31	0,811	0,811	ACEITO	ACEITO
		3,95	6,80			0,381	1,241	ACEITO	ACEITO
24 mm	0,15%	21,00	18,50	20,38	7,45	0,084	0,252	ACEITO	ACEITO
		30,00	12,00			1,291	1,124	ACEITO	ACEITO
24 mm	0,10%	185,75	89,50	163,94	51,74	0,422	1,439	ACEITO	ACEITO
		172,50	208,00			0,165	0,852	ACEITO	ACEITO
24 mm	0,05%	420,00	280,00	353,75	104,83	0,632	0,704	ACEITO	ACEITO
		250,00	465,00			0,990	1,061	ACEITO	ACEITO

Comprimento de fibra	Volume de fibra	A1 (mm ²)	A2 (mm ²)	xmédio	Desvio padrão	Razão		Resultado (<1,54)	
10mm	0,20%	0,00	0,00	106,69	124,79	0,855	0,855	ACEITO	ACEITO
		189,00	237,75			0,660	1,050	ACEITO	ACEITO
10mm	0,15%	101,00	55,00	147,94	92,02	0,510	1,010	ACEITO	ACEITO
		266,75	169,00			1,291	0,229	ACEITO	ACEITO
10mm	0,10%	639,50	427,50	488,50	111,85	1,350	0,545	ACEITO	ACEITO
		384,50	502,50			0,930	0,125	ACEITO	ACEITO
10mm	0,05%	691,10	346,00	507,40	145,33	1,264	1,111	ACEITO	ACEITO
		537,00	455,50			0,204	0,357	ACEITO	ACEITO

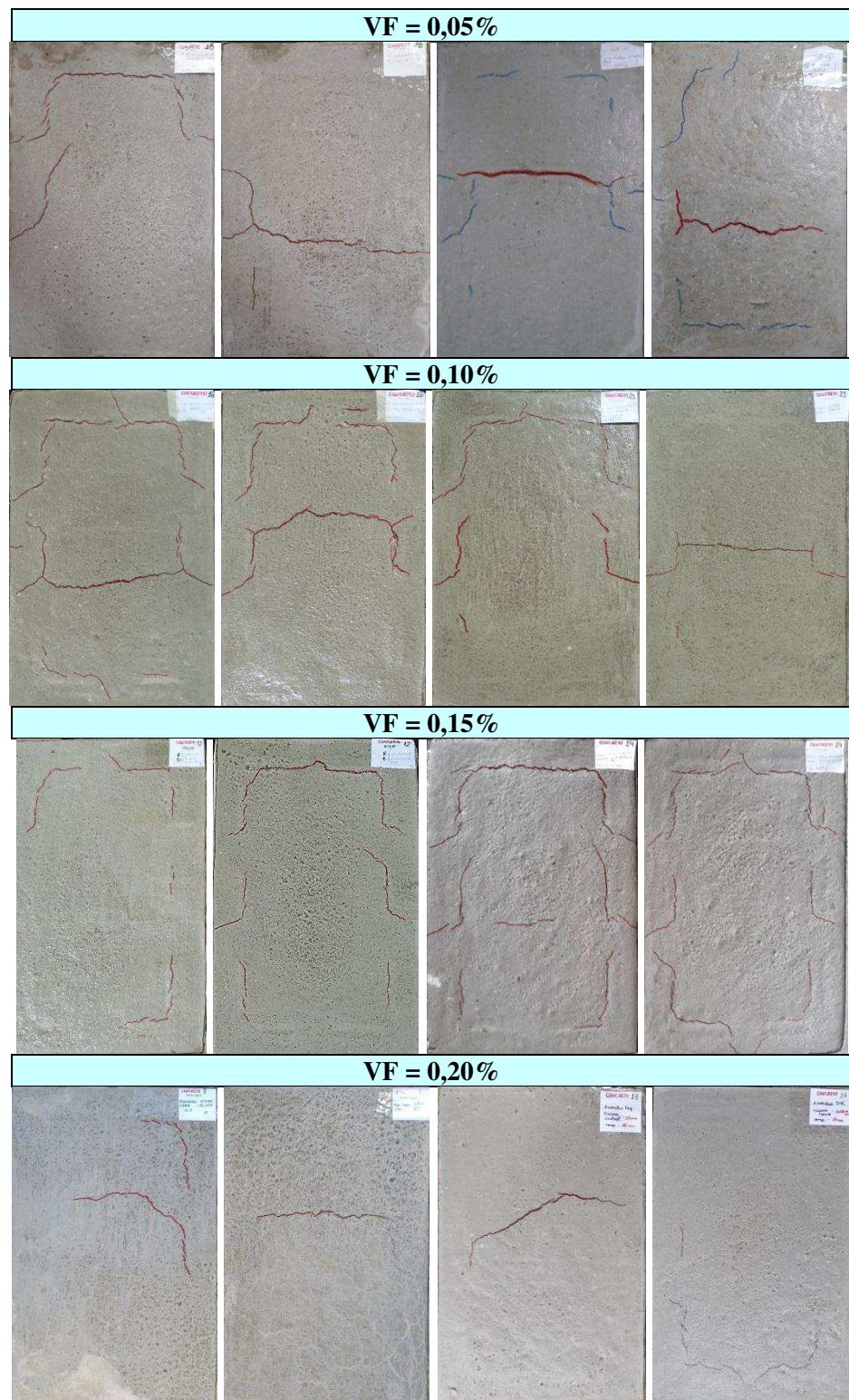
APÊNDICE F

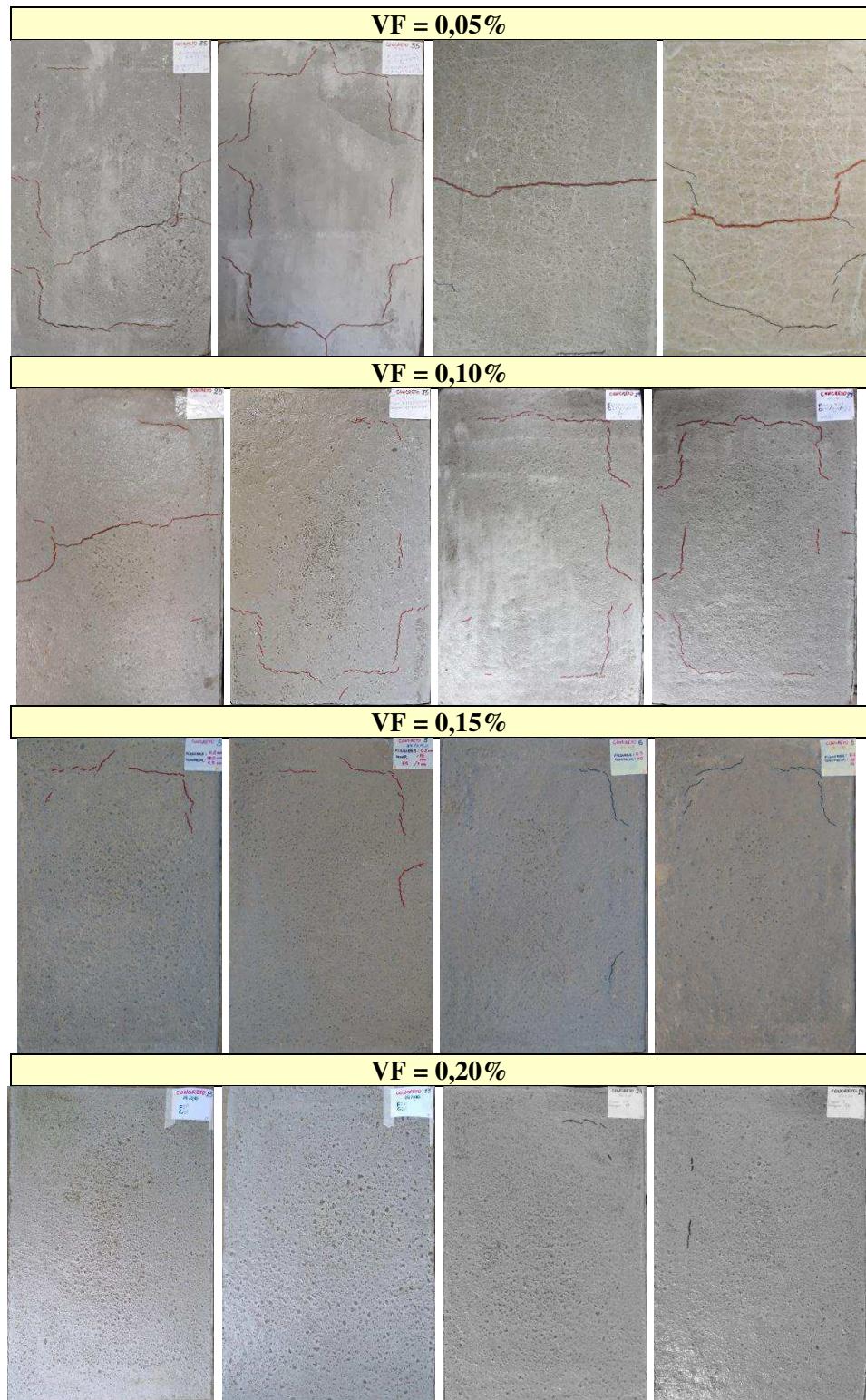
RESULTADOS VISUAIS DAS PLACAS PRODUZIDAS DURANTE ENSAIO

F.1 Concreto sem fibras



F.2 Concreto com fibra de 6 mm

F.3 Concreto com fibra de 12 mm

F.4 Concreto com fibra de 24 mm

F.5 Concreto com fibra de 10 mm