



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

JONATHA ROBERTO PEREIRA

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CONTROLE  
DE FISSURAS POR MICROFIBRA DE POLIPROPILENO EM CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL**

Limeira - SP  
2020

**JONATHA ROBERTO PEREIRA**

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO CONTROLE  
DE FISSURAS POR MICROFIBRA DE POLIPROPILENO EM CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL**

Tese apresentada à Faculdade de Tecnologia da  
Universidade Estadual de Campinas como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título de  
Doutor em Tecnologia na área de Ciência dos  
Materiais.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosa Cristina Cecche Lintz

Coorientador: Prof.<sup>o</sup> Dr. Antônio Carlos dos Santos

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À  
VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO  
ALUNO JONATHA ROBERTO PEREIRA, E  
ORIENTADO PELA PROFA. DRA. ROSA  
CRISTINA CECHE LINTZ

Limeira – SP  
2020

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia  
Felipe de Souza Bueno - CRB 8/8577

P414a Pereira, Jonatha Roberto, 1982-  
Análise comparativa entre métodos de avaliação do controle de fissuras por microfibras de polipropileno em concreto autoadensável / Jonatha Roberto Pereira. – Limeira, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Rosa Cristina Cecche Lintz.

Coorientador: Antônio Carlos dos Santos.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Concreto autoadensável. 2. Pesquisa - Metodologia. 3. Concreto - Expansão e contração. 4. Concreto - Testes. I. Lintz, Rosa Cristina Cecche, 1971-. II. Santos, Antônio Carlos dos. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Comparative analysis between evaluation methods of cracks control using polypropylene microfiber in self-compacting concrete

**Palavras-chave em inglês:**

Self-compacting concrete

Research - Methodology

Concrete - Expansion and contraction

Concrete - Testing

**Área de concentração:** Ciência dos Materiais

**Titulação:** Doutor em Tecnologia

**Banca examinadora:**

Rosa Cristina Cecche Lintz [Orientador]

Luísa Andréia Gachet

Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Nádia Cazarim da Silva Forti

Carlos Eduardo Marmorato Gomes

**Data de defesa:** 23-07-2020

**Programa de Pós-Graduação:** Tecnologia

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0003-3456-7956>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4907308156626023>

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Abaixo se apresentam os membros da comissão julgadora da sessão pública de defesa de tese para o Título de Doutor em Tecnologia na área de concentração de Ciência dos Materiais, a que submeteu o aluno Jonatha Roberto Pereira, em 23 de julho de 2020 na Faculdade de Tecnologia- FT/ UNICAMP, em Limeira/SP.

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Rosa Cristina Cecche Lintz**

Presidente da Comissão Julgadora

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup>. Luísa Andréia Gachet**

UNICAMP/FT – Universidade Estadual de Campinas

**Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo**

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

**Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Nádia Cazarim da Silva Forti**

PUC Campinas – Pontifícia Universidade Católica de Campinas

**Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes**

UNICAMP/FEC – Universidade Estadual de Campinas

Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria de Pós Graduação da FT.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta tese a todos os pesquisadores que por qualquer motivo sejam esses, pessoais, sociais ou políticos tiveram suas pesquisas adiadas ou interrompidas.

*“Os lábios da sabedoria estão fechados, exceto aos ouvidos do Entendimento.”*

O CAIBALION

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Astral Superior e aos Orixás (Setes Espíritos de Deus) por me permitir a luz do conhecimento.

À minha família Pai (*in memoriam*), Mãe e Irmãos.

À minha esposa Mariana Buratto pelo incondicional apoio, paciência, força, parceria e por me lembrar constantemente o porquê eu estava fazendo o doutorado.

À minha Orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosa Cristina Cecche Lintz, ao meu Coorientador Prof.<sup>o</sup> Dr. Antônio Carlos dos Santos e a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Luísa Andréia Gachet, pelo apoio, dedicação, orientação e por todo conhecimento compartilhado.

Às minhas amigas do mestrado e doutorado, Andressa, Fabiana, Marília e Thais. À minha amiga Lorena Silva da Universidade Federal de Uberlândia por toda a parceria e conhecimento compartilhado nos ensaios de retração.

A todos os meus (ex) alunos e (ex) alunas, em especial meus (ex) orientados(a) e hoje colegas de profissão, Eng.<sup>a</sup> Caroline Macedo, Eng.<sup>o</sup> Rafael Zaratín, Eng.<sup>o</sup> Hugo Severo, Eng.<sup>o</sup> William Rodrigues, Eng.<sup>a</sup> Stephanie Cucolo e ao Eng.<sup>o</sup> Abdallah Musa por todas as horas dedicadas no laboratório e nas pesquisas.

Ao amigo e Professor João Lamari pelo apoio e conhecimento compartilhado sobre extensômetros e sensores de deformação nos ensaios de retração.

À Faculdade de Tecnologia (FT/UNICAMP) pela oportunidade e suporte técnico para a realização desta pesquisa de doutorado. À Universidade Federal de Uberlândia pelo apoio e estrutura nos ensaios de retração. E ao laboratório do Centro Universitário Unimetrocamp.

Aos amigos da Coordenadoria de Manutenção da COHAB Campinas pela força e ajuda na manutenção dos equipamentos.

A todos os técnicos de laboratórios e funcionários que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desta Tese.

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

Por fim, agradeço a todos os membros (a) da banca pela participação, orientação e contribuição.

## RESUMO

Com a necessidade de popularizar o concreto autoadensável (CAA) nos canteiros de obras brasileiros, há a necessidade de explorar outras características além da fluidez, coesão e resistência mecânica que tem sido objeto de inúmeras pesquisas. Características que influenciam diretamente na durabilidade do CAA como a retração e o surgimento de fissuras vêm ganhando espaço no campo da pesquisa, uma vez que o emprego de agregados mais finos, utilização de aditivos superplastificantes e um alto teor de argamassa podem levar ao aumento do surgimento de fissuras no CAA devido ao processo de retração por secagem ou retração plástica. Este trabalho teve como objetivo avaliar, por meio das correlações das metodologias de ensaios de retração, placas e anéis com restrição, a influência da argamassa no potencial de surgimento de fissuras do CAA e o controle dessas fissuras por meio da adição de microfibras de polipropileno (PP). Para tanto, foram estudados traços de CAA e de argamassa, sendo: traço-referência e traços com teores de 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% de fibras de 6mm, 12mm e 24mm de comprimento, em relação ao volume. Para os ensaios de retração foram utilizados os critérios das normas ASTM C1579:2013 (placas) e ASTM C1581:2016 (anéis), e foram propostas novas dimensões nas placas e anéis para estabelecer as correlações entre os ensaios e apresentar uma metodologia para ensaios de retração do CAA. Para as análises das correlações foram utilizados os critérios do coeficiente PEARSON e a análise da regressão e variância (ANOVA). Os traços com adições de microfibras apresentaram diminuição significativa das fissuras no CAA e nas argamassas, variando de 40% a 98% a sua taxa de redução, apresentando também um retardo no surgimento destas que variou entre 9 a 20 dias para surgimento das primeiras fissuras. Os ensaios de placas e anéis apresentam correlações em relação ao potencial de surgimento de fissuras do CAA. A proposta de novas dimensões se apresentou viável para ensaios com baixo teor de adição e fibras entre 6 e 12 mm. Embora as maiores adições de fibras com maior comprimento tenham influenciado positivamente na diminuição das fissuras, estas influenciaram a fluidez e coesão do CAA e da argamassa. As fissuras nas argamassas, bem como sua idade média influenciaram diretamente nos resultados de fissuração e idade de fissuras do CAA. Fatores como área de forma, volume de CAA e da argamassa, teor de adição de fibras e comprimento das fibras são correlações fortes no que diz respeito ao surgimento e controle de fissuras no CAA nas primeiras idades e podem contribuir para maior durabilidade e qualidade das estruturas de concreto.

**Palavras-Chave:** ensaios de retração, concreto autoadensável (CAA), retração por secagem, retração plástica, fissuras.

## ABSTRACT

Having to popularize self-compacting concrete (SCC) in Brazilian construction sites, there is the necessity of exploring characteristics other than fluidity, cohesion and mechanical resistance that were the purpose of many researches. Characteristics that directly influence the durability of SCC, like retraction and cracks appearance, have been gaining space in fields of research, since the use of thinner aggregations, usage of super plasticised additives and a greater volume of mortar can lead to greater cracks appearance in SCC due to the drying or plastic retraction process. This work aims to check, through correlations in the method of boards and restricted rings shrinkage testing, the influence of mortar in the potential of cracks appearances in SCC and the control of these cracks by adding polypropylene (PP) fibre. To do this, we studied traces of SCC and mortar: adding reference traces and traces with 6mm, 12mm and 24mm long fibre to SCC volumes and 0,05%, 0,10% and 0,20% mortar. For the retraction tests, we used the criteria from norms ASTM C1579:2013 (boards) and ASTM C1581:2016 (rings), and proposed new board and ring dimensions to establish the correlation between the tests and show a SCC retraction test method. To analyse the correlations, we used the PEARSON coefficient criteria and the regression and variance analysis (ANOVA). The traces added with fibre showed significant decrease in craks of SCC and mortar, varying from 40% to 98% in reduction rate, as well as delaying the first fissures in 9 to 20 days. The board and ring tests showed correlations to potential cracks appearances in SCC. The proposal of new dimensions showed itself to be viable in low levels of fibre addition, between 6 and 12 mm. Though larger additions of longer fibre gave positive cracks reduction, it also influenced the fluidity and cohesion of SCC and mortar. The craks in mortar, as well as its average age influence directly in fissuring results and in the age of craks in SCC. Factors like shape area, SCC and mortar volume, level of fibre addition and fibre length are strong correlations in terms of the appearance and control of SCC craks in the first ages and can contribute to more durability and quality in concrete structures.

**Keywords:** retraction tests, self-compacting concrete (SCC), drying shrinkage, plastic shrinkage, craks.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Formação das pontes de transferências com adição de fibras no concreto ou efeito “costura”.	25
<b>Figura 2.</b> Fatores que influenciam diretamente nos processos de retração.	30
<b>Figura 3.</b> Ilustração do mecanismo de retração.	30
<b>Figura 4.</b> A - Relação entre a umidade relativa e perda de água; B - Influência da umidade relativa do ar em % e a retração por secagem a zona propicia para surgimento de fissuras.	32
<b>Figura 5.</b> Relação espessura e velocidade de evaporação.	33
<b>Figura 6.</b> Tipos de ensaios de retração do concreto.	36
<b>Figura 7.</b> Exemplo da metodologia do ensaio de placas com restrição; A – planta baixa da placa, B – C – D – corte esquemático do ensaio.	36
<b>Figura 8.</b> Ábaco de correlação para previsão de fissuras.	37
<b>Figura 9.</b> Projeto esquemático do ensaio de retração restringida.	39
<b>Figura 10.</b> Ensaio de anel metálico para medição de retração.	40
<b>Figura 11.</b> Exemplo da metodologia do ensaio do anel metálico para medição de retração.	42
<b>Figura 12.</b> Exemplo do gráfico de tensão de deformação x idade de fissura.	42
<b>Figura 13.</b> Fluxo do planejamento experimental.	49
<b>Figura 14.</b> Fibras de PP de A - 6 mm; B - 12 mm; C - 24mm.	52
<b>Figura 15.</b> Projeto esquemático do protótipo proposto, adaptação da ASTM C1579:2013.	54
<b>Figura 16.</b> Projeto esquemático do processo de ensaio de retração.	54
<b>Figura 17.</b> Protótipo para ensaio de retração – Detalhe A controle de temperatura e vento.	55
<b>Figura 18.</b> Detalhe interno da caixa para ensaio de retração.	55
<b>Figura 19.</b> Projeto das formas metálicas para ensaio de placas com restrição, A - placa 560x350 mm (ASTM C1579:2013); B - placa 300x300 mm (proposta autor).	56
<b>Figura 20.</b> Sistema de restrição formato “U”.	57
<b>Figura 21.</b> Fôrmas com o sistema de restrição para induzir as fissuras.	57
<b>Figura 22.</b> Projeto dos anéis metálicos para ensaio de retração, A - anel de acordo com ASTM C1581:2016; B - anel metálico de acordo com a proposta autor.	59
<b>Figura 23.</b> Anéis metálicos para o ensaio de retração, A - anel de acordo com ASTM C1581:2016; B - anel metálico de acordo com a proposta autor.	59
<b>Figura 24.</b> Exemplo dos extensômetros de 120Ω com fio de cobre soldados e encapsulado.	60
<b>Figura 25.</b> Metodologia para a instalação dos extensômetros; A - Processo de lixamento do anel; B - Área para colagem dos extensômetros; C - Fixação do extensômetro (centro do anel); D - Detalhe da fixação (aproximada).	60

<b>Figura 26.</b> Metodologia para o ensaio do anel com restrição: A - Conjunto de instalação para ensaio de retração e idade de fissura; B - <i>Template</i> da leitura da deformação medida pelos extensômetros...	61
<b>Figura 27.</b> Definição da dosagem e dos materiais para elaboração dos traços. ....	62
<b>Figura 28.</b> A – Empacotamento das fibras originais; B - Fibras separadas manualmente; C - Fibras adicionadas na ARG; C - Adição de fibras na betoneira - CAA. ....	64
<b>Figura 29.</b> Exemplos dos ensaios de espalhamento e índices de estabilidade visual. ....	65
<b>Figura 30.</b> Determinação da viscosidade – Método do funil V. ....	65
<b>Figura 31.</b> a) Adição agregados miúdos (areia + pó de brita); b) Adição do cimento; c) Adição da água; d) Mistura da argamassa. ....	66
<b>Figura 32.</b> A - Materiais para execução do ensaio de mini-abatimento; B - Realização do ensaio. ....	67
<b>Figura 33.</b> Exemplos A - Espalhamento da argamassa; B - Medição do diâmetro da argamassa. ....	67
<b>Figura 34.</b> Fluxo da moldagem e metodologia para os ensaios das placas com restrições. ....	68
<b>Figura 35.</b> A - Termostato com controle de temperatura para ensaio da ASTM C 1579:13; B - Termômetro digital para verificação da temperatura e umidade relativa do ar externa; C - Anemômetro digital para medição da velocidade do vento. ....	69
<b>Figura 36.</b> A - Termômetro a laser; B - Câmera termográfica para medir variação de temperatura. ....	69
<b>Figura 37.</b> A – Moldagem das Placas; B – Pesagem fôrma + CAA/ARG no estado fresco. ....	70
<b>Figura 38.</b> Metodologia do ensaio de indução de surgimento de fissuras segundo os critérios da norma ASTM C1579:2013; A - identificação dos sensores de medição e resistência aletada para geração do calor interno; B - Evaporação da água para acelerar o processo de secagem; C - Surgimento de fissuras. ....	70
<b>Figura 39.</b> Metodologia para identificação e medição das fissuras; A - Mapeamento para facilitar a identificação das fissuras; B - Identificação individual das fissuras; C - Utilização da régua fissuromêtro para calcular a largura das fissuras; D - Uso de lupas e lentes de aumento para facilitar a identificação. ....	71
<b>Figura 40.</b> Fluxo da moldagem e metodologia para os ensaios dos anéis com restrição. ....	72
<b>Figura 41.</b> A –Moldagem do anel de CAA; B - Moldagem do anel de CAA com a proposta de redução; C – Leitura da temperatura por meio do termômetro a laser. ....	72
<b>Figura 42.</b> Metodologia para lançamento do CAA/ARG no anel. ....	73
<b>Figura 43.</b> Exemplo da identificação e medição das fissuras. ....	73
<b>Figura 44.</b> Fluxo de apresentação dos resultados. ....	75
<b>Figura 45.</b> Curva granulométrica do pó de brita. ....	76
<b>Figura 46.</b> Curva granulométrica da Areia. ....	77
<b>Figura 47.</b> Curva granulométrica da Brita. ....	78
<b>Figura 48.</b> Exemplos dos resultados do ensaio de EIV; A – EIV 0; B – EIV 1; C – EIV 2. ....	79

<b>Figura 49.</b> Efeito da adição de fibras de polipropileno no ensaio de espalhando do CAA. ....	81
<b>Figura 50.</b> Efeitos da adição de fibras de polipropileno no CAA em relação ao ensaio de viscosidade. ....	82
<b>Figura 51.</b> Efeito da adição de fibras no ensaio do mini-abatimento. A - ARGRF <sub>0</sub> ; B - ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm; C - ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm; D - ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm. ....	84
<b>Figura 52.</b> Efeito da adição de fibras de polipropileno no ensaio do mini-abatimento da argamassa do CAA. ....	85
<b>Figura 53.</b> Análise visual do processo de redução da área de fissuração da placa de 560 x 350 mm de CAA em relação ao teor de adição das fibras. ....	86
<b>Figura 54.</b> Gráfico dos resultados das placas 560 x 350 mm – CAA – Largura das médias das fissuras. ....	87
<b>Figura 55.</b> Gráfico dos resultados das placas 560 x 350 mm – CAA – área média de fissuras. ....	89
<b>Figura 56.</b> Análise visual do processo de redução da área de fissuração da placa de 300 x 300 mm de CAA em relação ao teor de adição das fibras. ....	90
<b>Figura 57.</b> Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – CAA – largura média das fissuras. ....	91
<b>Figura 58.</b> Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – CAA – área média de fissuras. ....	92
<b>Figura 59.</b> Gráfico dos resultados das placas 560x350 mm – ARG – largura média das fissuras. ....	100
<b>Figura 60.</b> Gráfico dos resultados das placas 560 x 350 mm – ARG – área média das fissuras. ....	102
<b>Figura 61.</b> Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – ARG – largura média. ....	103
<b>Figura 62.</b> Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – ARG – Área média de fissuras. ....	104
<b>Figura 63.</b> Exemplos da identificação das fissuras no ensaio do anel; A – Uso de lentes de aumento (lupa); B – Identificação fissuras laterais; C – Identificação das fissuras na parte superior do anel. ....	110
<b>Figura 64.</b> Exemplos da identificação das fissuras no ensaio do anel; A – Fissuras traço ARGRF <sub>0</sub> ; B – Exemplos das Fissuras traço ARGRF <sub>6</sub> – 0,05%; C – Uso da régua de fissuras para medição da largura. ....	110
<b>Figura 65.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF <sub>6</sub> – 6mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016. ....	112
<b>Figura 66.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF <sub>12</sub> – 12mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016. ....	113
<b>Figura 67.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF <sub>24</sub> – 24mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016. ....	114
<b>Figura 68.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF <sub>6</sub> – 6mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios do CAA. ....	115
<b>Figura 69.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF <sub>12</sub> – 12mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios do CAA. ....	116

<b>Figura 70.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF <sub>24</sub> – 24mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios do CAA.....	117
<b>Figura 71.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF <sub>6</sub> – 6mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.....	123
<b>Figura 72.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF <sub>12</sub> – 12mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.....	125
<b>Figura 73.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF <sub>24</sub> – 24mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.....	126
<b>Figura 74.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura ARGF <sub>6</sub> – 6mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios da argamassa.....	127
<b>Figura 75.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF <sub>12</sub> – 12mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios da argamassa.....	129
<b>Figura 76.</b> Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF <sub>24</sub> – 24mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios da argamassa.....	130

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação. ....	28
<b>Tabela 2.</b> Índice de estabilidade visual.....	28
<b>Tabela 3.</b> Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação.....	28
<b>Tabela 4.</b> Geometria das peças de concreto na retração por secagem. ....	34
<b>Tabela 5.</b> Probabilidade de fissuração do concreto. ....	38
<b>Tabela 6.</b> Comparação entre os parâmetros para os ensaios de retração do concreto. ....	38
<b>Tabela 7:</b> Intensidade de correlação de acordo com o coeficiente de correlação PEARSON .....	48
<b>Tabela 8:</b> Característica do cimento utilizados .....	51
<b>Tabela 9.</b> Propriedades do aditivo utilizado. ....	51
<b>Tabela 10.</b> Propriedades das fibras de polipropileno.....	52
<b>Tabela 11.</b> Traços, em massa, do CAA e da Argamassa de referência. ....	62
<b>Tabela 12:</b> Apresentação da nomenclatura, teor de adição de microfibras de PP, número de placas e anéis por traço. ....	63
<b>Tabela 13.</b> Composição granulométrica do pó de brita. ....	76
<b>Tabela 14.</b> Granulometria da areia natural. ....	77
<b>Tabela 15.</b> Composição e classificação granulométrica do agregado graúdo. ....	78
<b>Tabela 16:</b> Resultados do ensaio de índice de estabilidade visual (IEV). ....	79
<b>Tabela 17:</b> Resultados do CAA no estado fresco e endurecido do CAARF <sub>0</sub> . ....	80
<b>Tabela 18:</b> Resultados do cálculo do coeficiente de Pearson (r) – Cone de Abrams x Funil “V”. ....	82
<b>Tabela 19:</b> Análise da adição das fibras de polipropileno no ensaio mini-abatimento e coeficiente de correlação PEARSON. ....	84
<b>Tabela 20:</b> Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação as placas 560 x 350 mm.....	87
<b>Tabela 21:</b> Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 560 x 350 mm. ....	88
<b>Tabela 22:</b> Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 300 x 300 mm. ....	91
<b>Tabela 23:</b> Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno – placas 300 x 300 mm. ....	92
<b>Tabela 24:</b> Resultados comparativos entre as placas 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – CAARF <sub>0</sub> . ....	94
<b>Tabela 25:</b> Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – CAARF <sub>6</sub> – 6 mm....	94
<b>Tabela 26:</b> Resultados da matriz de correlação – CAARF <sub>6</sub> – 6mm. ....	95
<b>Tabela 27:</b> Resultados comparativos entre as 560x350 mm e 300 x 300 mm – CAARF <sub>12</sub> – 12 mm. ..	96

<b>Tabela 28:</b> Resultados da matriz de correlação – CAARF <sub>12</sub> – 12mm.....	96
<b>Tabela 29:</b> Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – CAARF <sub>24</sub> – 24 mm.	97
<b>Tabela 30:</b> Resultados da matriz de correlação – CAARF <sub>24</sub> – 24mm.....	97
<b>Tabela 31:</b> Resultados da análise de regressão – ANOVA – Placas do CAA.....	98
<b>Tabela 32:</b> Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 350 x 560 mm.....	100
<b>Tabela 33:</b> Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 560 x 350 mm. ....	101
<b>Tabela 34:</b> Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 300 x 300 mm.....	103
<b>Tabela 35:</b> Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 300 x 300 mm. ....	104
<b>Tabela 36:</b> Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF <sub>0</sub> .....	106
<b>Tabela 37:</b> Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm..	106
<b>Tabela 38:</b> Resultados da matriz de correlação – ARGRF <sub>6</sub> – 6mm. ....	107
<b>Tabela 39:</b> Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm. ....	107
<b>Tabela 40:</b> Resultados da matriz de correlação – ARGRF <sub>12</sub> – 12mm. ....	108
<b>Tabela 41:</b> Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm.	108
<b>Tabela 42:</b> Resultados da matriz de correlação – ARGRF <sub>24</sub> – 24mm.....	109
<b>Tabela 43:</b> Resultados da análise de regressão ARG – ANOVA.....	109
<b>Tabela 44:</b> Resultados comparativos entre os ensaios dos anéis – CAA. ....	120
<b>Tabela 45:</b> Matriz de correlação entre os ensaios dos anéis – CAA. ....	122
<b>Tabela 46:</b> Resultados comparativos entre os ensaios dos anéis – argamassa. ....	131
<b>Tabela 47:</b> Matriz de correlação entre os ensaios dos anéis – Argamassa. ....	133
<b>Tabela 48.</b> Comparação dos resultados dos ensaios de placa de restrição encontrados por diversos pesquisadores, com os resultados obtidos nesta pesquisa. ....	134
<b>Tabela 49:</b> Matriz de correlação entre os ensaios das placas – CAA e ARG.....	135
<b>Tabela 50:</b> Resultados da análise de regressão placas de CAA e ARG – ANOVA.....	136
<b>Tabela 51.</b> Comparação dos resultados dos ensaios do anel restrição encontrados por diversos pesquisadores, com os resultados obtidos nesta pesquisa. ....	137
<b>Tabela 52:</b> Matriz de correlação entre os ensaios dos anéis – CAA e argamassa. ....	138
<b>Tabela 53:</b> Resultados da análise de regressão anéis CAA e argamassa – ANOVA. ....	139

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1.</b> Origem das principais retrações do concreto. ....	31
<b>Quadro 2.</b> Principais trabalhos relacionados aos ensaios de placas com restrição. ....	39
<b>Quadro 3.</b> Principais trabalhos sobre ensaios com anel de restrição.....	43

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b><i>INTRODUÇÃO</i></b>	<b>19</b>
1.1.	Objetivo Geral	21
1.2.	Objetivos específicos	21
<b>2.</b>	<b><i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i></b>	<b>22</b>
2.1.	Concreto	22
2.2.	Concreto Autoadensável (CAA)	23
2.2.1.	CAA reforçado com Fibras	25
2.2.2.	Métodos e Ensaios do CAA no Estado Fresco	27
2.2.3.	Deformação do concreto	28
2.3.	Retração do concreto	29
2.3.1.	Retração por secagem ou hidráulica	31
2.4.	Ensaio de retração do concreto	35
2.4.1.	Ensaio de retração com restrição - Placas	36
2.4.2.	Ensaio de retração com restrição – Anéis de restrição	40
2.4.3.	Análise estatística e correlações	47
<b>3.</b>	<b><i>PROGRAMA EXPERIMENTAL</i></b>	<b>49</b>
3.1.	Metodologia	49
3.2.	Materiais Utilizados	50
3.2.1.	Cimento Portland	50
3.2.2.	Aditivo superplastificante	51
3.2.3.	Fibras de Polipropileno	52
3.3.	Definição dos Ensaio de retração e elaboração de protótipos e fôrmas para ensaios de retração e fissuras	53
3.3.1.	Avaliação do potencial de fissuração por meio do ensaio de placas com restrição – ASTM C1579:2013	53
3.3.2.	Avaliação da retração e da idade de fissuração – ASTM C1581:2016	58
3.4.	Cálculo das dosagens do CAA e da Argamassa	61
3.4.1.	Composição do CAA e argamassa de referência	61
3.4.2.	Composição do CAA e da argamassa com adições de fibras	62
3.5.	Produção e ensaios no estado fresco dos CAA e das argamassas, e moldagem das placas e anéis	64
3.5.1.	Produção e ensaios no estado fresco do CAA	64
3.5.2.	Produção e ensaios no estado fresco das Argamassas	66
3.5.3.	Moldagem das placas e dos anéis	67
3.5.4.	Metodologias de correlação dos resultados	74
<b>4.</b>	<b><i>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</i></b>	<b>75</b>
4.1.	Resultados da caracterização dos materiais	75
4.1.1.	Caracterização do pó de brita (agregado miúdo)	75
4.1.2.	Caracterização da areia natural (agregado miúdo)	76

4.1.3.	Caracterização da brita 0 (agregado graúdo)	78
<b>4.2.</b>	<b>Resultados do CAA e argamassa no Estado Fresco e endurecido</b>	<b>79</b>
4.2.1.	Resultados do CAA no estado fresco e endurecido	79
4.2.2.	Resultados da Argamassa (ARG) no estado fresco	83
<b>4.3.</b>	<b>Resultados dos ensaios das Placas com restrição</b>	<b>85</b>
4.3.1.	Resultado dos ensaios da placa com restrição no CAA	85
4.3.2.	Resultados dos ensaios da placa com restrição na Argamassa (ARG)	99
<b>4.4.</b>	<b>Resultados dos ensaios do anel com restrição</b>	<b>110</b>
4.4.1.	Resultado dos ensaios com anel – CAA	111
4.4.2.	Resultado dos ensaios com anel – Argamassa	122
4.4.3.	Comparação e correlações das metodologias dos ensaios de retração	133
<b>5.</b>	<b><i>CONCLUSÕES</i></b>	<b>140</b>
<b>6.</b>	<b><i>PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</i></b>	<b>141</b>
<b>7.</b>	<b><i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i></b>	<b>142</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Uma área tão abrangente e complexa como a engenharia civil possui uma infinidade de materiais e compósitos que, com critérios adequados, vão muito além do previsto em relação aos seus benefícios e tipos de utilização. Um desses compósitos é o concreto. Material de elevada versatilidade, facilidade de produção e de obtenção da matéria-prima que, conhecidas as propriedades e características específicas durante sua produção, moldagem e cura, é possível identificar variáveis que prejudicam seu comportamento e que possam torná-lo suscetível ao surgimento de patologias ou ataque de agentes externos. A retração, em seus vários tipos, é uma das propriedades resultantes das características do concreto e dos processos internos gerados durante o endurecimento (SOARES, 2015; ALCÂNTARA et al., 2015; BARBOSA et al., 2019).

A retração é a redução de volume pela perda de umidade de um elemento de concreto, seja no estado fresco ou no estado endurecido. No concreto armado, essas mudanças volumétricas da pasta são restringidas pela presença do agregado graúdo, da armadura ou pela forma da peça estrutural. Como o concreto está na fase de cura e ganho de resistência, ainda não é capaz de suportar as tensões de tração que surgem superficialmente, o que pode vir a gerar fissuras que podem se expandir ao longo do tempo (SOARES, 2015).

Dadas as preocupações com o controle do surgimento e abertura destas fissuras no concreto, surge a necessidade de utilização de fibras poliméricas. Estas fibras são utilizadas para reduzir a segregação e a retração à secagem ou para incrementar a resistência ao fogo (EFNARC, 2010).

A utilização de fibras e microfibras para reforçar o concreto permite aumentar a estabilização das tensões geradas durante a abertura de fissuras e a elasticidade do material, segundo considerações de Kakooei et al. (2012), pois, 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. Ainda segundo o autor, a formação de fissuras no concreto promove a abertura ao meio interno do material, ou seja, causa um aumento da permeabilidade e permite que agentes externos possam degradar a estrutura interna do concreto, comprometendo assim, a durabilidade da peça projetada.

Um dos principais fatores relacionados aos processos de fissuração e retração é o

fenômeno da hidratação do cimento Portland. Estudos e pesquisas voltados ao entendimento das reações químicas que ocorrem nessa fase de hidratação vêm crescendo nos últimos anos (GAMBALE, 2017).

O processo de hidratação do cimento decorre de reações de superfícies entre a água e o grão de cimento por meio de mecanismos de dissolução-precipitação ou reações topoquímicas (hidratação no estado sólido), que liberam calor (exotérmicas), elevando a temperatura. Este aumento de temperatura por sua vez, requer uma garantia maior da hidratação do grão do cimento, e, quando isso não ocorre, o processo de endurecimento do cimento pode ser comprometido, causando, em muitos casos, a retração da peça (NONAT, 2014; PONS e TORRENTI, 2014; GAMBALE, 2017).

Segundo Pons e Torrenti (2014), o perfil das estruturas atuais requer, em muitos casos, um consumo elevado de cimento, resistências características mais elevadas, restrição à dissipação de calor e que possam apresentar menor valor de dilatação e retração, como por exemplo, os chamados concretos especiais, como o concreto de alto desempenho (CAD) e concreto autoadensável (CAA).

Ao longo dos anos, inúmeras pesquisas foram sendo desenvolvidas com o intuito de conhecer melhor o comportamento do CAA (ALCÂNTARA et al., 2015; ANGELIN et al., 2015; LONG et al., 2015), e considerações apresentadas por Campos (2017) e Miranda et al. (2017), ressaltam a importância de melhorar suas propriedades, estudar novas adições em sua composição e verificar sua aplicabilidade e comportamento em peças estruturais.

Para a obtenção de um CAA, são empregadas maiores quantidades de finos, uso de superplastificantes, consumo menor dos agregados graúdos, relação água/cimento aproximada de 0,4 e agregados de boa forma e textura (KAR e SANJAY, 2016; JADHAV, PAWAR e DOKHALE, 2017). No entanto, estas características podem levar o CAA a um aumento de fissuras, devido ao processo de retração por secagem ou retração plástica, podendo comprometer a durabilidade do mesmo. Dessa forma, a adição de fibras no concreto tem como objetivo atuar diretamente no ganho de resistência à fissuração, resistência à flexão e contribuir no combate à retração do CAA.

Segundo Kakooei et al. (2012) e Acker, Torrenti e Guérinet (2014), o controle de fissuração do concreto é de grande importância para uma maior durabilidade dos elementos ao longo do tempo e para o ganho de 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 susceptível a ataques externos que podem danificar a armadura. Desta forma, o desempenho, a necessidade de manutenção, durabilidade dos elementos e estética das estruturas e concreto também são reduzidas.

Devido ao pouco conhecimento sobre o assunto, e por ainda não existir muitos resultados no Brasil que utilizem equipamentos e métodos de avaliação dos processos de retração e o potencial de fissuras do CAA, o presente trabalho visa contribuir com o estudo e desenvolvimento de metodologias para ensaios de retração do CAA e viabilidade da adição de fibras de polipropileno (PP) no combate ao surgimento de fissuras e controle de retração.

### **1.1. Objetivo Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a metodologia de ensaios de retração, obter por meio das correlações e análises estatísticas o potencial de surgimento das fissuras do CAA e apresentar alternativas de metodologias para ensaios de retração do CAA.

### **1.2. Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, esse trabalho visa:

- Avaliar as metodologias de ensaios de retração por meio de correlações e análises estatísticas;
- Avaliar o potencial de fissura do CAA e a correlação da influência da argamassa no surgimento das fissuras;
- Avaliar a proposta de alteração na metodologia dos protótipos (fôrmas) como alternativa para os ensaios de retração por secagem e previsão de surgimento das fissuras do CAA e da Argamassa.
- Avaliar a adição de fibras de polipropileno como variável para a validação das correlações entre os ensaios de retração.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Concreto

Para a produção dos concretos especiais, cada vez mais se faz necessário o entendimento das características intrínsecas do concreto, tais como: inter-relação de cada componente do concreto com o meio externo, módulos de finuras do cimento e o calor de hidratação, a interface da zona de transição pasta-agregado-adição-aditivos, deformação, retração e fluência. São fatores que cada vez mais estão presentes em pesquisas e estudos visando evoluir na tecnologia da produção de concretos especiais (PONS e TORRENTI, 2014; ROCHA, 2015; NEVILLE e BROOKS, 2016; BARBOSA et al., 2019).

O processo de deformação, seja por carregamento excessivo ou pelo processo de retração por secagem com surgimento de fissuras, vem sendo cada vez mais estudado como um dos principais fatores que podem influenciar na vida útil do concreto (ACKER, TORRENTI e GUÉRINET, 2014; SILVA, BATTAGIN e GOMES, 2017; VIEIRA, 2017).

O processo de retração está diretamente relacionado ao processo de hidratação sendo fatores fundamentais para o potencial de retração e surgimento de fissuras, a velocidade de hidratação e de liberação de calor no processo de endurecimento do concreto (GAMBALE, 2017). O módulo de finura do cimento é outro fator que influencia diretamente na sua reação com a água. Quanto mais fino é o cimento, mais rápido ele reage com a água, e maior é sua resistência à compressão. Entretanto, a finura aumenta o calor de hidratação liberado no processo de endurecimento do cimento e conseqüentemente, auxilia na retração, tornando o concreto suscetível à fissuração (GAMBALE, 2017; SILVA, BATTAGIN e GOMES, 2017).

Segundo Ambrozewicz (2012) outra propriedade do cimento que deve ser observada é a expansibilidade pois, se o cimento apresentar cal livre em teores elevados, quando combinado com a água, produzirá  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido de cálcio) e  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (hidróxido de magnésio). Essas reações geram o aumento do volume na pasta de cimento e, como consequência, pode surgir fissuração excessiva no concreto.

No entanto, autores como Bullard et al. (2011), Ambrozewicz (2012), Kurdowski (2014) destacam que o processo de hidratação do cimento influencia nas propriedades como durabilidade, resistência e deformação das pastas, argamassas e concretos.

O processo de endurecimento do cimento Portland se dá pela hidratação dos

compostos anidros, ou seja, a mistura de seus compostos com a água, e, conseqüentemente, o ganho de resistência. Os silicatos e aluminatos, quando estão em contato com a água, formam produtos de hidratação, que, com o decorrer do tempo, começam a formar uma rede microestrutural coesiva, se desenvolvendo com o aumento do número de hidratos, dando origem a uma massa com características rígidas, que constitui a pasta de cimento endurecida (SILVA, BATTAGIN e GOMES, 2017).

A hidratação do cimento ocorre pelo mecanismo de dissolução precipitação, pela dissolução gradual das fases anidras do clínquer e da gipsita, supersaturação da solução e precipitação dos hidratos sobre as partículas (SPING, 2007; GAMBALE, 2017).

No processo de reação de hidratação do cimento, ocorre a liberação de energia térmica devido às reações exotérmicas. A capacidade de liberação de calor, segundo Aurich (2008), Antônio e Recena (2014) e Nonat (2014) é a propriedade mais importante que deve ser considerada durante o processo de hidratação do cimento.

Ainda segundo os autores, com a liberação de calor, ocorre uma expansão volumétrica, seguida de uma contração que, na presença de restrições externas, como as fôrmas e armaduras, ou internas, como os agregados graúdos, podem provocar a fissuração do concreto.

Considerações apresentadas por Antônio e Recena (2014) e Gambale (2017), a quantidade e o tipo de cimento, temperatura ambiente inicial de lançamento, aspectos geométricos e dimensionais das peças de concreto, podem influenciar diretamente na velocidade de hidratação, velocidade de liberação de calor e na quantidade total de calor gerado ao longo do processo de endurecimento do concreto.

Como consequência, quanto maior a velocidade de hidratação e liberação de calor no processo de endurecimento, maior será a relação de expansão e de retração volumétrica das peças produzidas com cimento Portland. Esta relação, quando ocorre em maior quantidade e em maior velocidade, aumenta a possibilidade da deformação das peças por retração excessiva e o potencial de fissuração.

## **2.2. Concreto Autoadensável (CAA)**

O CAA pode ser definido como um concreto fluído e coeso, que pode ser moldado *in loco*, sem o uso de vibradores para seu adensamento. É caracterizado pela sua alta

trabalhabilidade e resistência à segregação, dispensando qualquer tipo de vibração mecânica. Possui basicamente a mesma composição do concreto convencional (CCV), entretanto, possui um volume maior de argamassa e uma maior composição de agregados de granulometrias mais finas (DE LA CRUZ, RAMOS e HURTADO, 2017).

De acordo com as considerações apresentadas por Abukhashaba, Mostafa e Adam (2014), o CAA pode ser definido como um concreto capaz de fluir sob seu próprio peso, podendo vencer obstáculos, como armaduras de aço, com capacidade de preencher por completo formas de qualquer dimensão, por apresentar um alto consumo de materiais mais finos e o uso de aditivos superplastificantes.

Pontos apresentados por Olafusi et al. (2015), Kumar, Rao e Kumar (2017) e Miranda et al. (2017), ressaltam a importância da dosagem de aditivos superplastificantes e de modificadores de viscosidade (AMV), pois podem influenciar diretamente nas propriedades reológicas do CAA, comprometendo seu desempenho no estado endurecido.

Segundo EFNARC (2010), o CAA deve apresentar três propriedades fundamentais: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação. A fluidez é a capacidade que o concreto apresenta de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços. A habilidade passante é a propriedade que caracteriza a capacidade de as misturas escoarem pela fôrma e armaduras, sem que ocorra a obstrução do fluxo ou segregação. E a resistência à segregação é a propriedade que define a capacidade do concreto permanecer fluído dentro das fôrmas.

A primeira norma Brasileira que abordou os critérios e procedimentos para execução do CAA foi ABNT NBR 15823:2010, dividida em seis partes, a qual sofreu atualização no ano de 2017. De acordo com a ABNT 15823-1:2017 o CAA sofre segregação dinâmica durante o lançamento e segregação estática após o lançamento. No caso de lajes com pouca espessura a segregação estática pode levar ao surgimento de fissuras.

Alguns pontos devem ser destacados como a possibilidade e concretagem de peças mais esbeltas e de seções reduzidas: o alto teor de resíduos finos (maior teor de argamassa), a reação mais rápida das partículas de cimento com a água e o uso de aditivos superplastificantes são fatores potenciais para a retração e o surgimento de fissuras no CAA (ROZIÈRE et al., 2007; ANGELIN et al., 2015; D'AMBROSIA, LANGE e BRINKS, 2015; KAR e SANJAY, 2016).

As pesquisas com ênfase nos aspectos de dosagem, propriedades no estado fresco

e no estado endurecido, durabilidade, viabilidade econômica, aplicação de diversos aditivos e adições vêm crescendo desde a origem do CAA. Os entendimentos de outras características do CAA como deformação, fluência, retração e potencial de surgimento de fissuras, contribuem para o aumento de uso nos canteiros de obra (ALTOUBAT et al., 2017; BARODAWALA, SHAH e SHAH, 2017; COSTA e CABRAL, 2019).

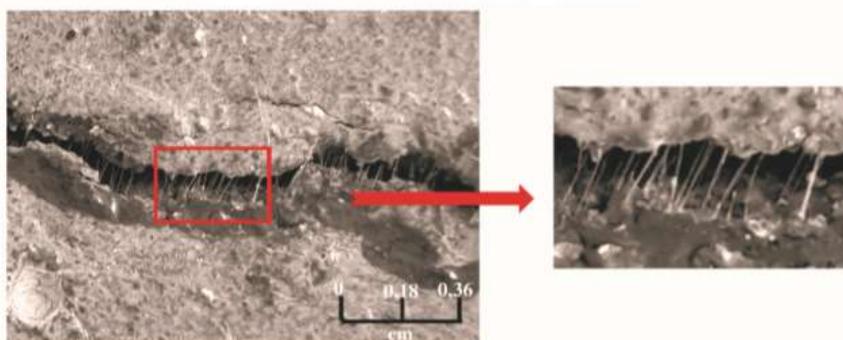
### 2.2.1. CAA reforçado com Fibras

O uso do concreto reforçado com fibras (CRF) vem crescendo na indústria da construção civil internacional e no mercado brasileiro. Este tipo de tecnologia permite obter vantagens aplicativas importantes, pois o reforço é adicionado ao concreto no processo de mistura, reduzindo o número de etapas de aplicação (CÁCERES et al., 2015).

As fibras possuem diferentes formatos e dimensões e são produzidas de aço, vidro, plástico, polipropileno ou materiais naturais. As fibras de polipropileno são divididas em dois tipos básicos: as microfibras e as macrofibras (FIGUEIREDO, 2011). A adição de fibras no concreto pode contribuir para melhorias em diversas propriedades da matriz cimentícia como tenacidade à flexão, resistência ao impacto, resistência à fadiga e resistência à fissuração (ARIF, 2014; AMARAL JUNIOR, SILVA e MORAVIA, 2017).

Conforme Giroto (2012) e Salvador e Figueiredo (2013), uma das razões mais importantes para se utilizar fibras no reforço do concreto é a de aumentar a estabilização das tensões geradas durante a abertura de fissuras. As fibras têm a característica de atuar como uma ponte de transferência das tensões (efeito “costura”) superficiais geradas durante a cura do concreto, reduzindo a tensão existente e, por consequência, o tamanho da abertura destas fissuras, como mostra a Figura 1.

**Figura 1.** Formação das pontes de transferências com adição de fibras no concreto ou efeito “costura”.



**Fonte:** Adaptado de Silva (2018)

As microfibras de polipropileno (PP) (sintéticas), objeto de estudo desta pesquisa, são da família dos produtos químicos de poliolefina. O reforço de fibras de PP tem, entre as suas funções, a de controlar as fissurações causadas por mudanças de volume em matrizes de concreto e auxiliam no controle da microfissuração que ocorre durante o endurecimento da pasta de cimento e, por este motivo, seu uso é recomendado em estruturas como pisos e lajes, ou seja, estruturas com grande superfície (MASHHADBAN, KUTANAEI e SAYARINEJAD, 2016 e KUMAR, RAO E KUMAR, 2017).

Outro ponto apresentado pela microfibra de PP está relacionado com seu módulo de elasticidade, ou seja, apresenta um módulo de elasticidade inferior ao da matriz cimentícia, por isto são utilizadas como reforço secundário do concreto nas primeiras idades após o lançamento do concreto, período em que o mesmo ainda apresenta baixa resistência e pequeno módulo de elasticidade, contribuindo assim com um reforço para o concreto nas primeiras horas (BENTUR E MINDESS, 2007; SALVADOR E FIGUEIREDO, 2013).

Segundo Bentur e Mindess (2007); Abreu e Oliveira (2015) e Dias (2018), o comprimento das fibras apresenta uma relação direta com o desempenho do compósito, ou seja, quanto menor o comprimento da fibra, maior será a possibilidade de serem arrancadas sobre pressão de alguma carga.

Conforme observado por Alcântara et al. (2015); Angelin et al. (2015); Long et al. (2015); Souza (2016) e Cristofoli et al. (2018), a alta taxa de adição de finos adicionados no CAA para manter as características de fluidez e trabalhabilidade, podem contribuir para uma maior taxa de retração e fluência nas primeiras idades, em comparação com o concreto convencional, potencializando assim o surgimento de fissuras.

O CAA com adição de fibras para reforço é conhecido CAARF. As microfibras podem ser utilizadas como reforço secundário para aprimorar as qualidades do CAA nas primeiras idades, da mesma forma em que são utilizadas no concreto convencional, tendo como principal objetivo combater o surgimento das fissuras (ASLANI e NEJADI, 2013).

Entretanto, as adições de fibras no CAA podem influenciar diretamente na trabalhabilidade e na fluidez. Esta redução da trabalhabilidade é um dos desafios para a utilização do concreto com fibras *in loco*, devido à dificuldade existente de manipulação do material e a distribuição de fibras no compósito (ASLANI e NEJADI, 2013; CRISTOFOLI et al., 2018).

De acordo com Yadegaran et al. (2007) e EFNARC (2010), a adição de fibras

metálicas no CAA visa proporcionar um reforço nas resistências mecânicas, como tenacidade e resistência à flexão, enquanto outros tipos de fibras, como as microfibras PP, são mais utilizadas para reduzir a segregação, retração e surgimento de fissuras.

De acordo com Abukhashaba, Mostafa e Adam (2014), as microfibras de PP podem contribuir para o retardo do surgimento das fissuras e reforço secundário na retração das peças de concreto. Além disso os pesquisadores observaram que:

- a adição das fibras influencia diretamente na trabalhabilidade do CAA, quando comparado com o CAA sem adição;
- houve queda na resistência à compressão no CAA com fibras;
- ocorreu diminuição da retração no CAA com fibras.

Yehia et al. (2016) propuseram uma metodologia de ensaios expondo as peças de CAA a ciclos de molhagem e secagem. Todas as misturas contendo fibras atingiram fluidez adequada, atendendo a capacidade e resistência à segregação. No entanto, o uso de microfibras de PP reduziu a capacidade de passagem do CAA mais do que a fibra de aço.

Mashhadban, Kutanaei e Sayarinejad (2016) analisaram os efeitos das fibras na produção do CAA utilizando rede neural artificial para analisar o CAARF no estado fresco e no estado endurecido (resistência mecânica e durabilidade). Nesse estudo, foram propostas nove misturas de concreto, contendo dois tipos de fibras: a) fibras de sulfureto de polifenileno com adições de 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4% em volume e b) fibras de aço nas adições de 0,1, 0,2, 0,3 e 0,4% em volume. Os resultados obtidos mostraram que as propriedades mecânicas podem ser melhoradas pelo reforço de fibra, contudo, a trabalhabilidade do CAARF diminuiu com o aumento de fibra. Além disso, as fibras de aço apresentam melhor desempenho com relação às propriedades mecânicas se comparadas com as fibras de sulfeto de polifenileno.

### **2.2.2. Métodos e Ensaios do CAA no Estado Fresco**

Os ensaios, métodos, procedimentos e equipamentos para a caracterização do CAA no estado fresco estão apresentados na ABNT NBR 15823-1:2017 e tem como objetivo verificar a trabalhabilidade, coesão, fluidez e a capacidade de resistir à segregação, simultaneamente. Esses critérios e parâmetros podem ser vistos nas Tabelas 1 a 3.

**Tabela 1.** Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.

Classe de espalhamento	Espalhamento mm
SF 1	550 a 650
SF 2	660 a 750
SF 3	760 a 850

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017

**Tabela 2.** Índice de estabilidade visual.

IEV	Crítérios
0 (altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação
1 (estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação da massa de concreto
2 (instável)	Uma pequena auréola de argamassa ( $\leq 10$ mm) e/ou empilhamento de agregados no centro da massa de concreto
3 (altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro da massa de concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades

Fonte: ABNT NBR 15823-1:2017

**Tabela 3.** Classes de viscosidade plástica aparente do CAA em função de sua aplicação.

Classe de viscosidade plástica aparente	t <sub>500</sub> segundos	Funil V Segundos
VS 1/VF 1	$\leq 2$	$< 8$
VS 2/VF 2	$< 2$	9 a 25

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2017)

### 2.2.3. Deformação do concreto

O concreto apresenta deformações que podem ser a) oriundas de carregamento, como as de caráter elástico e inelástico e as decorrentes do resultado da reação do material ao ambiente (temperatura, umidade relativa do ar, por exemplo), que tem como resultado as deformações por retração, por secagem e por resfriamento. Os principais tipos de deformações apresentadas pelo concreto estão vinculados com o módulo de elasticidade (tensão x deformação), fluência e os processos de retração (PONS e TORRENTI, 2014; SOUZA et al., 2015; SILVA, 2016; VIEIRA, 2017).

As considerações apresentadas por Rozière et al. (2007) Neville e Brooks (2016) destacam que a principal diferença entre a fluência e os processos de retração está diretamente vinculada com a estrutura estar sob uma carga externa (fluência) e outro processo à ausência de cargas externas (retração).

De acordo com Pillar (2014), Kar e Sanjay (2016), a retração do concreto pode ser

definida como sendo uma deformação relacionada com a variação de temperatura ao longo do tempo de secagem do concreto, sem carregamento da peça e com movimentação livre.

O processo de retração do concreto está relacionado com a deformação ocorrida na pasta do cimento no processo de perda da água. Essa deformação pode ocorrer em argamassas e concretos sem que ocorra qualquer carregamento da peça, reações químicas ou variações térmicas (ISAIA, 2011; FRANCINETE JUNIOR, SILVA E LOPES, 2018).

Segundo Leemann, Nygaard e Lura (2014), Soares (2015) e a retração do concreto pode ser entendida como sendo a mudança de volume do concreto devido à evaporação da água no processo de secagem ou à sucção da água por uma superfície de contato com o concreto.

De acordo com Gambale (2017), Jadhav, Pawar e Dokhale (2017), uma das principais consequências da mudança volumétrica do concreto é o surgimento de fissuras, que afeta diretamente a permeabilidade e durabilidade do concreto. Essa variação do volume do concreto, proporciona um aumento na tensão desenvolvida, que em muitos casos, excedem as tensões de resistência do concreto.

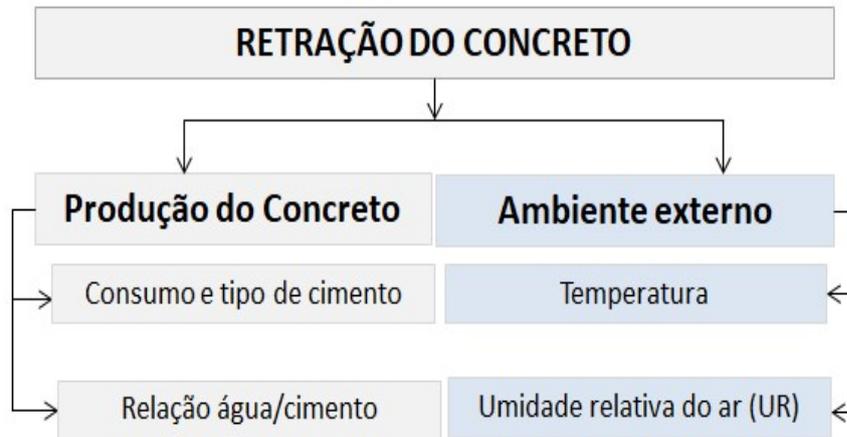
Outros fatores podem influenciar na retração do concreto. Estudos apresentados por Giroto, Barbosa e Maciel (2014) e Yang et al. (2019) destacam que as condições climáticas, tipos de cimento, dimensão dos agregados, presença de finos no concreto, maior volume de argamassa, uso de aditivo superplastificantes e maior volume de água de amassamento podem contribuir no processo de retração de concretos e argamassas e potencializar o surgimento de fissuras.

### **2.3. Retração do concreto**

O processo de retração do concreto está sempre vinculado à variação volumétrica causada pela perda de água, seja na forma de evaporação ou sucção. Entretanto, outros fenômenos que ocorrem no concreto podem ocasionar o processo de retração, como reações químicas e variações térmicas (HELENE e ANDRADE, 2017).

Os principais fatores que influenciam diretamente nos processos de retração do concreto e no surgimento de fissuras estão vinculados com a produção do concreto e com o meio ambiente externo, como apresentado na Figura 2.

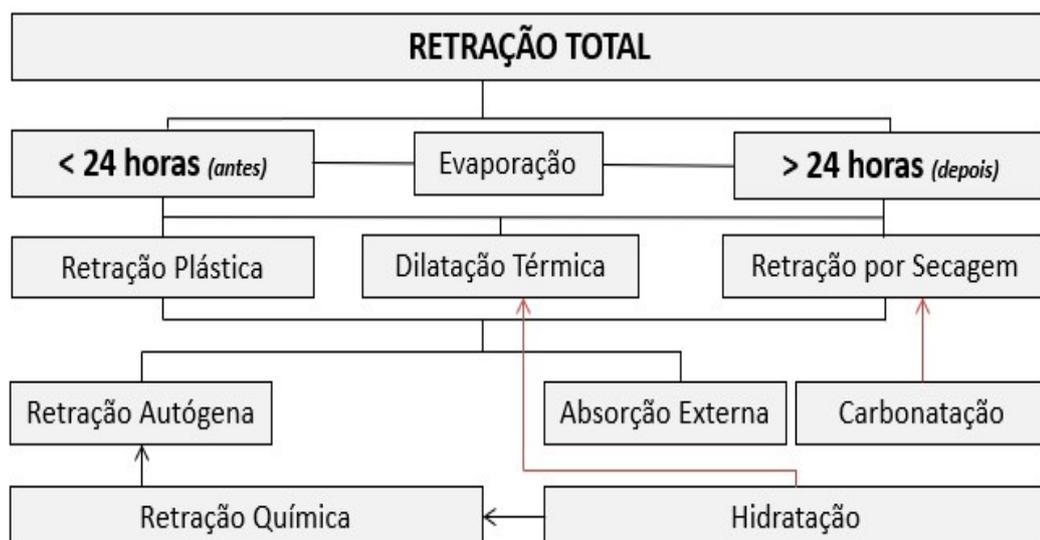
**Figura 2.** Fatores que influenciam diretamente nos processos de retração.



Fonte: Elaborado pelo autor

A retração no concreto pode ser dividida em dois momentos: antes das primeiras 24 horas e depois das 24 horas de aplicação do concreto, em que podem ocorrer a retração plástica, autógena, química, secagem, carbonatação, térmica, conforme Figura 3 e que são explicadas em seguida.

**Figura 3.** Ilustração do mecanismo de retração.



Fonte: Adaptado de Sping (2007)

O Quadro 1 apresenta as principais origens das retrações que ocorrem no concreto.

**Quadro 1.** Origem das principais retrações do concreto.

<b>Tipo de Retração</b>	<b>Descrição</b>	<b>Origem</b>
<b>Plástica</b>	Toda retração que ocorre no compósito cimentício quando este se encontra no estado fresco	Secagem; Reação química de hidratação; Autossecação.
<b>Autógena</b>	Toda retração que ocorre a partir do início de pega, sem a interferência de perda ou ingresso de água, variação de temperatura, aplicação de força externa ou restrição.	Reação química de hidratação; Autossecação.
<b>Por Secagem ou hidráulica</b>	Retração que ocorre em qualquer tempo, devido à perda de umidade do compósito cimentício para o ambiente.	Secagem
<b>Por Carbonatação</b>	Retração que ocorre devido à redução no volume dos compostos hidratados do cimento após reação química de carbonatação	Reação química de carbonatação
<b>Térmica</b>	Retração que ocorre com o resfriamento do compósito cimentício	Variação de temperatura
<b>Química</b>	Redução volumétrica do compósito devido às altas taxas de reações químicas que ocorrem no processo de hidratação do cimento ainda no estado fresco	Hidratação do cimento e reações químicas nos compostos da estruturação molecular

Fonte: Adaptado de Souza (2014)

### 2.3.1. Retração por secagem ou hidráulica

A retração por secagem ou retração hidráulica, consiste na contração irreversível, decorrente da variação de umidade das pastas de cimento, argamassa ou concreto, assim como em outros materiais cuja estrutura interna seja de natureza porosa (NEVILLE e BROOKS, 2016).

Conforme apresentado por Nunes e Figueiredo (2007) e Antônio e Recena (2014), a retração por secagem tem o mesmo princípio da retração plástica, entretanto, a retração por secagem ocorre em peça já definida e não em uma porção de concreto no estado fresco.

De acordo com Souza (2014) e Silva (2016), o processo de retração por secagem pode ser entendido como uma contração volumétrica, causada pela saída da água da pasta de cimento hidratada, provocando deformações nas peças de concreto, sem a influência das cargas de carregamento.

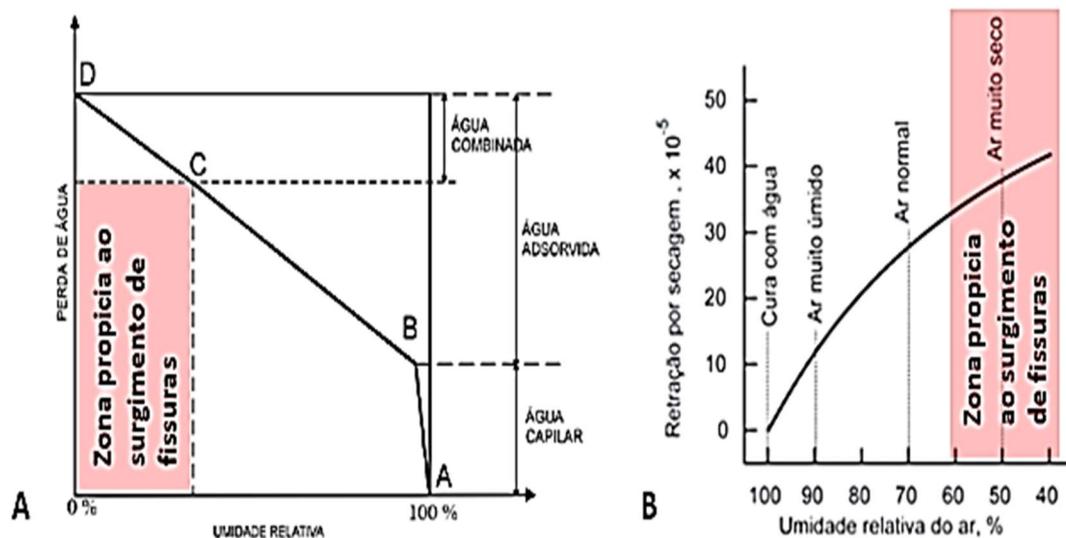
O processo de retração por secagem pode ocorrer em etapas, dependendo da maneira como a água está sendo eliminada. Segundo Acker, Torrenti e Guérinet (2014), essas

etapas são classificadas conforme o grau de dificuldade ou facilidade da retirada da água e dividem-se em: água capilar, água adsorvida, água interlamelar e água quimicamente combinada.

O entendimento do grau de dificuldade ou facilidade da retirada da água está relacionada com a evaporação desta da água no concreto, ou seja, sua interação com a evaporação da água deve ser observada para um maior entendimento no processo de retração por secagem. Souza (2014), Silva (2016) e Vieira (2017), ressaltam que a retração por secagem é influenciada concomitantemente por fatores externos e internos, como tipo e finura do cimento e relação água/cimento. Dentre os fatores externos estão a temperatura, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, os quais têm influência direta na taxa de evaporação e na perda de umidade da superfície do concreto.

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 Figura 4 apresenta a relação entre umidade relativa e a perda de água, considerando as quatro etapas de retirada de água.

**Figura 4.** A - Relação entre a umidade relativa e perda de água; B - Influência da umidade relativa do ar em % e a retração por secagem a zona propícia para surgimento de fissuras.



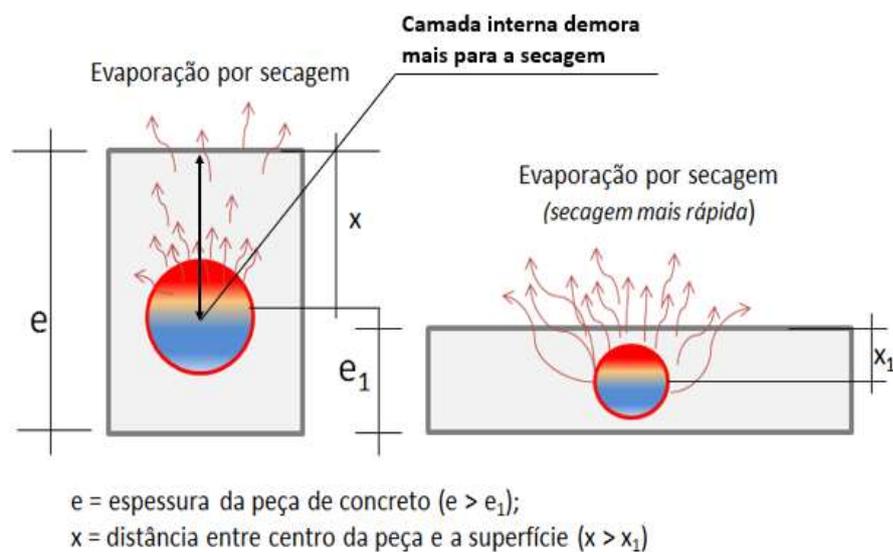
Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2014)

Fatores como o aumento da temperatura, a redução da umidade relativa do ar e o aumento da velocidade do vento no entorno do elemento de concreto, tendem a aumentar a retração por secagem. Além disso, a retração tende a ser maior se o concreto estiver exposto a

essas condições desfavoráveis por um período prolongado de tempo (ANTÔNIO e RECENA, 2014; SOUZA, 2014; SILVA, 2016; VIEIRA, 2017; HUANG et al., 2018).

De acordo com Diniz, Fernandes e Kuperman (2011) e Vieira (2017), a geometria e a dimensão da peça de concreto são fatores que influenciam no processo de retração por secagem. A relação das espessuras das peças de concreto está relacionada com o tempo de secagem, ou seja, peças mais espessas apresentam tempo maior de secagem, pois as camadas internas levam um tempo maior para secagem devido a uma seção transversal menor. Peças estruturais que possuem maior relação superfície/volume, como as lajes, tendem a perder umidade mais rapidamente, como apresentado na Figura 5.

**Figura 5.** Relação espessura e velocidade de evaporação.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Segundo Silva (2016), a geometria das peças de concreto, na retração por secagem, está relacionada com a espessura teórica ou fictícia (que é definida como o dobro da seção transversal da peça, dividido pelo perímetro exposto). A ABNT NBR 6118:2014 apresenta a relação entre geometria e perímetro exposto, conforme Tabela 4.

**Tabela 4.** Geometria das peças de concreto na retração por secagem.

Umidade ambiente (%)		40		55		75		90		
Espessura Fictícia 2Ac / u - cm		20	60	20	60	20	60	20	60	
$\epsilon_{cs}(t_x, t_0)$ 0/00	$t_0$ dias	5	-0,44	-0,39	-0,37	-0,33	-0,23	-0,21	-0,10	-0,09
		30	-0,37	-0,38	-0,31	-0,31	-0,20	-0,20	-0,09	-0,09
		60	-0,32	-0,36	-0,27	-0,30	-0,17	-0,19	-0,08	-0,09

Onde:  $\epsilon_{cs}(t_x, t_0)$  - deformação específica de retração;  
2Ac/u - espessura fictícia;  
Ac - área da seção transversal;  
u - perímetro da seção em contato com a atmosfera.

**Fonte:** Adaptado de ABNT NBR 6118:2014

Os fatores internos que influenciam na retração por secagem, estão relacionados diretamente com os materiais constituintes do concreto tais como: cimento, agregados, adições e relação água/cimento.

Os processos e técnicas construtivas adotadas durante as etapas de produção e aplicação do concreto, como lançamento, adensamento e cura, também exercem influência na retração (DINIZ, FERNANDES e KUPERMAN, 2011; ANTÔNIO e RECENA, 2014; SILVA, 2016).

As variações de composição e de granulometrias dos tipos de cimento afetam a taxa de hidratação, mas não influenciam diretamente o volume e as características dos hidratos, ou seja, algumas variações na composição do cimento como finura e adições, que tendem a causar alguma influência no comportamento do processo de secagem de pastas ou argamassas com pequenas dimensões, não causam influência significativa no concreto. A maior retração de uma pasta pura não corresponde necessariamente a uma maior retração do concreto (WEST, DARWIN e BROWNING, 2010; BATTAGIN e BATTAGIN, 2017).

Ainda assim, o modelo apresentado pelo CEB-FIP Model Code 56 (1990), com o objetivo de realizar a previsão da retração por secagem do concreto ao longo do tempo, identificou que os concretos produzidos com o cimento de alta resistência inicial, de maior finura, apresentaram maior retração quando comparados com concretos de cimentos de endurecimento lento, até mesmo os concretos de mesma resistência aos 28 dias.

Um dos principais pontos discutidos com relação ao processo de retração por secagem é a relação água/cimento (a/c), que está diretamente vinculada a qualidade e durabilidade do concreto, ou seja, quanto maior a relação a/c, menor é a resistência do

concreto e, conseqüentemente, maior é a retração por secagem. Isto acontece em função do decréscimo de resistência e do módulo de deformação (IDIART, 2009; PONS e TORRENTI, 2014; NEVILLE e BROOKS, 2016).

Idiart (2009); Mehta e Monteiro (2014) e Souza (2014), ressaltam que um maior consumo de água ocasionará maior quantidade de água evaporada e, assim, maior é o potencial do concreto para sofrer tensões de retração. Aumentando-se o consumo de cimento, maior é a fração da pasta de cimento e, assim, maior é o potencial de retração do concreto/argamassa. O potencial de retração não está diretamente relacionado apenas com o aumento do consumo de água ou do cimento, mas sim com o aumento do volume da pasta de cimento, o que significa um decréscimo na fração do agregado, que tem o papel de restringir a retração.

#### **2.4. Ensaaios de retração do concreto**

Os ensaios voltados para mensurar os processos de retração que ocorrem nas peças de concretos, sejam no estado fresco ou no estado endurecido, consistem basicamente na medição da variação da deslocação ou da volumetria da peça estudada em relação a um período de tempo.

Nunes e Figueiredo (2007), Melo Neto (2008) e Pillar (2014) indicam que as metodologias experimentais dos ensaios de retração podem ser divididas em relação:

- a) ao formato das peças (que podem ser em placa, anel e linear, ou seja, peças prismáticas);
- b) as ações internas ou passivas, ou seja, livre de qualquer carregamento externo, onde é medida apenas a variação volumétrica;
- c) as ações externas ou ativas, quando a deformação é medida ao longo da ação de um carregamento imposto.
- d) aos critérios do ambiente;

Os ensaios também podem ser classificados de acordo com seu grau de liberdade de deslocamento no estado endurecido. Assim, os ensaios podem ser classificados como retração no estado livre ou restringidos como apresentado na Figura 6.

**Figura 6.** Tipos de ensaios de retração do concreto.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

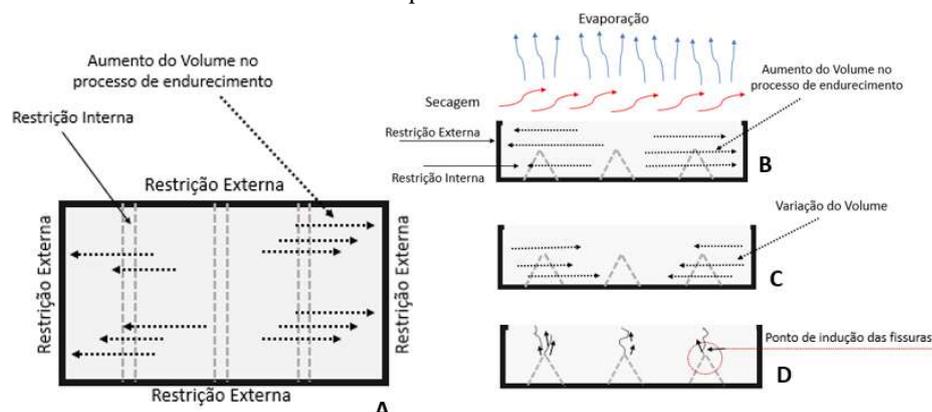
Segundo Peres, Bassi e Silva Filho (2009), Pillar (2014), Gupta e Biparva (2017) e Turcry et al. (2017) os ensaios que avaliam a retração restringida vêm crescendo nos últimos vinte anos. A sua concepção consiste em produzir corpos-de-prova em formato de placas ou anéis, restringindo seu deslocamento por fôrmas metálicas. Os ensaios de retração restringida permitem uma avaliação direta da potencialidade de fissuração de um material.

A seguir são apresentados os ensaios de retração com restrição em placas e anéis.

#### 2.4.1. Ensaios de retração com restrição - Placas

Os ensaios de retração em placas têm como principal objetivo analisar o potencial de fissuras que surgem nas placas de ensaios. As placas possuem dimensões e espessuras variadas, entretanto, é possível observar uma geometria retangular. Com o objetivo de induzir as fissuras ao longo do processo de secagem da peça, são utilizados dentro das formas, pontos fixos, como restrição, como apresentado na Figura 7.

**Figura 7.** Exemplo da metodologia do ensaio de placas com restrição; A – planta baixa da placa, B – C – D – corte esquemático do ensaio.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

A metodologia consiste em estabelecer um processo de secagem e taxa de evaporação da placa de concreto criando uma relação entre umidade relativa do ar, velocidade do ar e temperatura, por um período de tempo, que possam proporcionar uma variação volumétrica ao longo do processo de secagem e, por meio de elementos fixos nas fôrmas, induzir o surgimento de fissuras em um período curto de secagem.

Segundo as normas ACI - 305R-10, ACI - 308-92 e concrete Q&A (2007) é possível prever as possibilidades do surgimento das fissuras em placas de concreto de acordo com a Equação 1 ou utilizando as correlações do ábaco de taxa de evaporação como apresentado na Figura 8 e na Tabela 5.

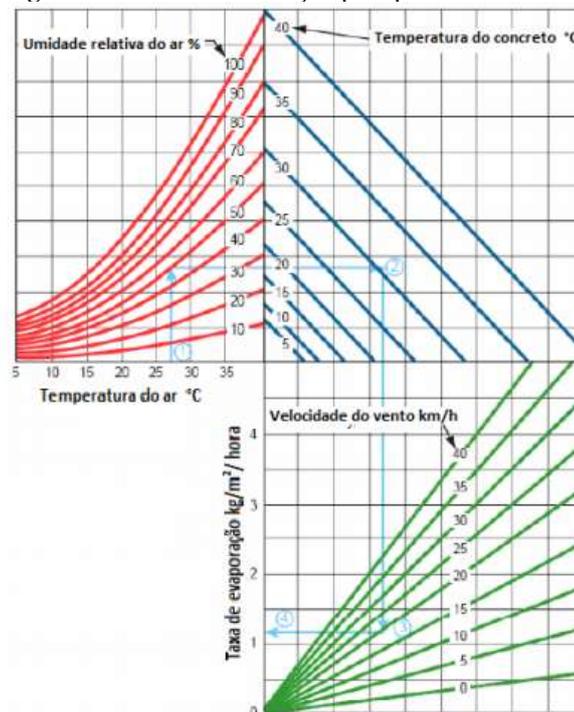
$$E = 5 \times ([Tc + 18]^{2,5} - r \times [Ta + 18]^{2,5}) \times (V + 4)10^{-6}$$

(Equação 1)

Onde:

- $E$  = taxa de evaporação da água (kg/m<sup>2</sup>/h)
- $Tc$  = temperatura do concreto (C°)
- $r$  = umidade relativa do ar (%)
- $Ta$  = temperatura do ar (C°)
- $V$  = velocidade do vento (km/h)

**Figura 8.** Ábaco de correlação para previsão de fissuras.



Fonte: Adaptado ACI - 305R-10, Concrete Q&A (2007)

**Tabela 5.** Probabilidade de fissuração do concreto.

Taxa de evaporação (kg/m <sup>2</sup> /h)	Probabilidade
0 – 0,5	Improvável
0,51 – 1,0	Moderada
>1,0	Elevada

**Fonte:** Adaptado ACI - 305R-10, Concrete Q&A (2007)

Na prática, o ensaio da placa com restrição pode ser interpretado como a concretagem de uma laje/radier, ou seja, a de um elemento que possui uma área superficial maior que sua espessura. As restrições externas podem ser entendidas como as fôrmas (madeira/metálicas) e as restrições internas podem ser entendidas como as armaduras ativas e passivas e de transição. Outra análise que pode ser feita é a concretagem de contrapisos e pisos, tendo como restrições externas as vigas baldrame e alvenarias.

As bases normativas que estabelecem critérios e parâmetros para os ensaios das placas são o ensaio ICC-ES AC 32 - 2018 e a norma ASTM C1579:2013. A Tabela 6 apresenta as principais diferenças entre estes ensaios.

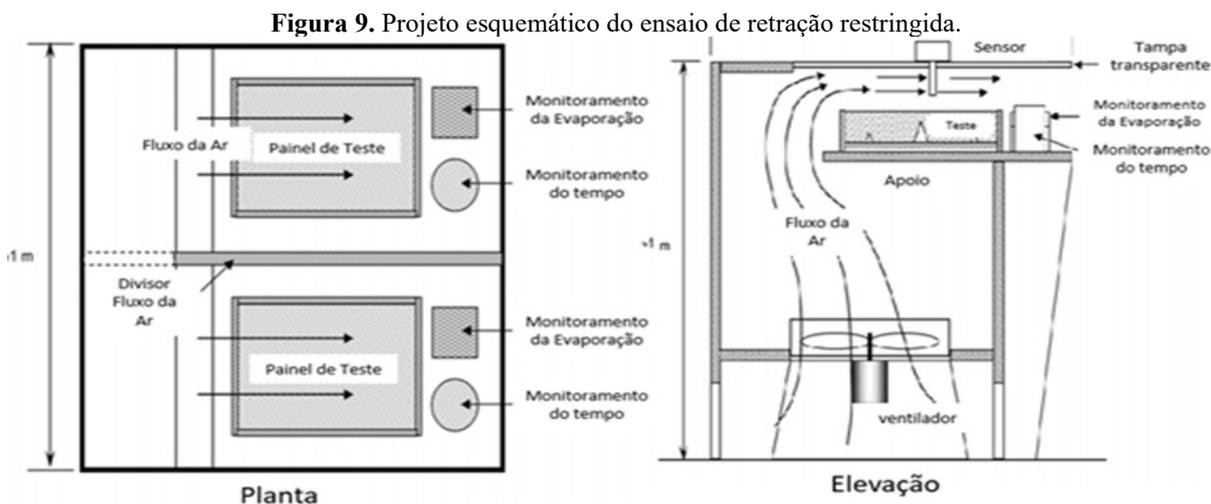
**Tabela 6.** Comparação entre os parâmetros para os ensaios de retração do concreto.

Propriedades	Ensaio ASTM C1579(2013)	ICC-ES AC 32 (2018)
Taxa de evaporação	1,0 Kg/m <sup>2</sup> .h	0,975 Kg/m <sup>2</sup> .h
Área de evaporação	1,0 m <sup>2</sup>	0,0929 m <sup>2</sup>
Balança	3,0 kg	2,2 kg
Agregados	19 mm	19 mm
Forma (área) x (altura)	0,1988 m <sup>2</sup> x 160 mm	0,1600 m <sup>2</sup> x 102 mm
Restrição interna	32 mm (2) / 63,5 mm	31,7 mm (2) / 63,5 mm
Vento	16,92 km/h	16,10 km/h
Número de amostras	2	6
Vibração	Até nivelar	12 s
Superfície	Sem recomendações	Camada de Magnésio + água
Intervalo	30 min	30 min
Unidade de fissuração	mm	mm <sup>2</sup>
Mínimo CRR	Não recomenda	40%

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Para este trabalho foram utilizados os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1579:2013. As considerações apresentadas pela ASTM C1579:2013 tem como objetivo avaliar pelo método comparativo, a fissuração em placas de concreto reforçados com fibras, por meio do processo de secagem e perda de umidade da água.

A metodologia deste ensaio consiste na produção de placas de concreto em fôrma metálica, para restringir o deslocamento e induzir as fissuras pelo processo de secagem, simulando a ação de vento e mudança de temperatura, como apresentado na Figura 9.



Fonte: adaptado de ASTM C1579:2013

O Quadro 2 tem como objetivo apresentar as principais pesquisas, metodologias e resultados dos ensaios de placas com restrição para análise do potencial de fissuras.

**Quadro 2.** Principais trabalhos relacionados aos ensaios de placas com restrição.

Referência	Objetivo	Metodologia	Resultados
Barluenga e Hernández-Olivares, 2007	Avaliar a influência da temperatura e vento e fibras de vidro na formação de fissuras do CAA.	Câmara de controle com fôrmas dimensão de 122 x 122 x 19,5cm. restrição interna a partir do posicionamento perimetral de seções metálicas em formato de "U". Adição de fibras de vidro para controle das fissuras. Adições de 600, 900 e 1000 g/m <sup>3</sup> .	As adições de 600 g/m <sup>3</sup> não apresentaram resultados significativos em relação a trabalhabilidade do CAA e apresentou os maiores resultados em redução área de fissura. As maiores quantidades não apresentaram maiores valores. não há uma linear relação entre quantidade de fibra e eficiência de controle
Pelisser et al., 2010	Avaliar o efeito da adição de fibras sintéticas, como polipropileno, vidro, nylon e PET, no controle de trincas de concreto convencional	Câmara de controle com fôrmas nas dimensões 910 x 610 x 20 mm, sistema de restrição tipo "U". Adição de fibras no teor de 0,05% e 0,10%	As fibras 0,05% de polipropileno reduziam significativamente o surgimento de fissuras nas placas. Para a redução das larguras das fissuras as adições 0,10% ou mais, são as mais recomendadas
Giroto, Barbosa e Maciel, 2014	Avaliar a fissuração da argamassa do CAA com adição de aditivo superplastificante e da adição mineral - sílica ativa e filler basáltico causada pelo processo de retração plástica	Placas metálicas quadrada de 20cm de lado com 1cm de espessura. O fundo da placa é dentado simetricamente, tendo cada, uma espécie de dente, com 0,5cm de altura. medição das fissuras é realizada através do programa computacional Image Tool	Área fissurada é maior para a composição com adição de sílica ativa tanto em ensaios com vento e sem vento. A ação do vento aumentou a fissuração das amostras e foi mais efetiva para a composição com adição de filler basáltico. O estudo reológico das pastas e das argamassas podem auxiliar, a compreensão da retração plástica e da fissuração do CAA.

(cont. quadro 2). Principais trabalhos relacionados aos ensaios de placas com restrição

Referência	Objetivo	Metodologia	Resultados
Gupta e Biparva, 2017	Avaliar efeito de aditivos de impermeabilização cristalina na fissuração precoce em concreto	As dimensões dos moldes apresentadas pelos autores eram de 355 ( $\pm$ 10) mm x 560 ( $\pm$ 10) mm x 100 ( $\pm$ 5) mm e continham uma placa metálica de aumento de tensão, que foi parafusada ao fundo do molde.	Ganho na redução da área de fissuração nas amostras com adição impermeabilizantes cristalinas, sendo a mostra que a K apresentou uma razão de redução de fissuras de aproximadamente 80% e 55% sob as condições padrão e modificada
Silva, 2018	Avaliar a influência da adição de microfibras de polipropileno no processo de retração hidráulica no CAA. A metodologia proposta teve como base a norma ASTM C1579:2013 e seus respectivos critérios para avaliação	Placas 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. fibras de PP com os comprimentos de 6, 10, 12 e 24 mm e nas adições de 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% em relação ao volume de CAA.	Todos os tipos de fibras e adições contribuíram para controlar o surgimento de fissuras causadas pela retração hidráulica, tendo as fibras de maior comprimento e maior adição (10, 12 e 24mm) apresentando os melhores resultados. o tempo médio de surgimento das fissuras foram de 3 horas após o início do ensaio.

#### 2.4.2. Ensaios de retração com restrição – Anéis de restrição

O ensaio do anel com restrição tem como principal objetivo avaliar, por meio da análise da deformação do anel, a idade média do surgimento de fissuras nos compósitos cimentício.

Nele, uma amostra de concreto fresco é compactada ao redor de um molde circular em forma de um anel central, feito de aço conforme pode ser visto na Figura 10. As restrições nesses ensaios são determinadas por um anel interno fixo, onde são instalados sensores de medição de deformação e um anel externo removível.



Fonte: Adaptado da ASTM C1581/C1581M (2016)

A tensão de compressão desenvolvida no anel, causada pela retração do concreto, é mensurada com o uso de extensômetros elétricos (*strain gages*) ao longo do tempo após a moldagem.

De acordo com Hoffman (1989), Francinete Junior, Silva e Lopes (2018) e Silva et al. (2019) os extensômetros elétricos podem ser entendidos como uma grade de fio metálico sensível. O valor da deformação é obtido a partir da variação de resistência, que é correlacionada com o valor de tensão elétrica aplicada.

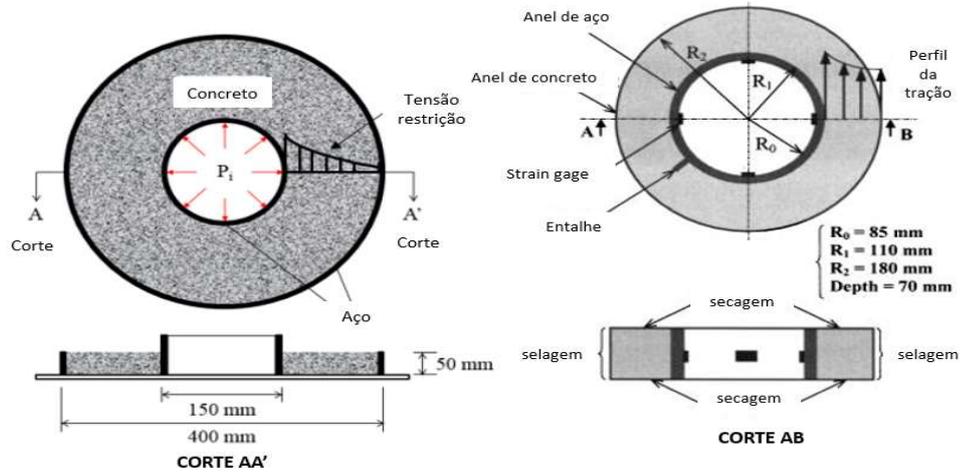
Considerações apresentadas pelos pesquisadores Guadagnini, Saraiva e Elisabeth (2011) os extensômetros são instalados na estrutura que vai ser analisada antes da aplicação dos esforços externos. Após aplicação de força, esta promove deformações na estrutura que são diretamente transmitidas para a base do extensômetro, que por sua vez deforma a resistência metálica, fazendo assim a variação da mesma.

Ainda segundo os autores as estruturas que apresentam pouca deformação ou pouca variação se faz necessário a utilização da Ponte de Wheatstone, que pode ser entendida como um circuito elétrico onde o extensômetro ou os extensômetros são ligados a resistores de igual potência, o que totalizam quatro braços resistivos, sendo que a variação de resistência é medida indiretamente pela variação de tensão elétrica da saída da Ponte, proporcional a variação de resistência nos extensômetros.

De acordo com Nam et al. (2016), em relação ao ensaio do anel de restrição os extensômetros realizam a variação da deformação que ocorre na expansão volumétrica ao longo processo de endurecimento do concreto/argamassa com a tensão de compressão/tração medida no anel interno.

Ainda segundo os autores, 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 durante a retração do concreto, como mostrado na Figura 11.

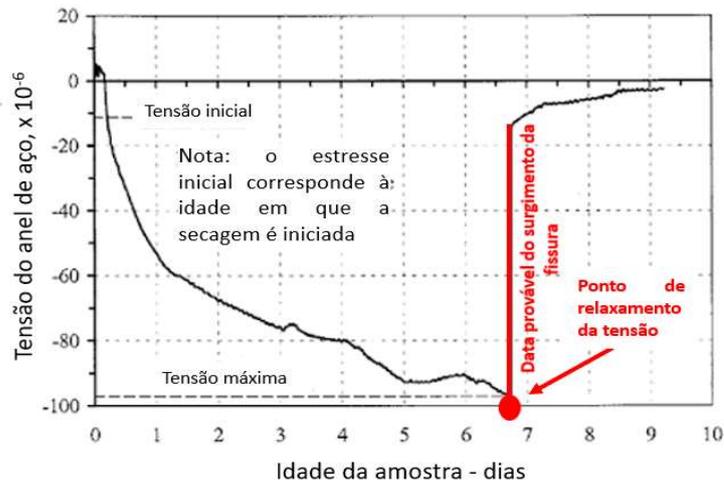
**Figura 11.** Exemplo da metodologia do ensaio do anel metálico para medição de retração.



Fonte: Adaptado Nam et al. (2016)

Essa 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 como apresentado na Figura 12. As normativas referentes aos ensaios são a NT BUILD 433:1995, AASHTO - PP 34:2006 e ASTM C1581:2016. Ainda segundo as normativas referentes aos ensaios de anéis com restrição e considerações apresentadas por Hoffman (1989), Francinete Junior, Silva e Lopes (2018) e Silva et al. (2019) a deformação pode ser apresentada como  $\mu\text{m}/\text{m}$ ,  $\times 10^{-6}$  m/m,  $\mu\epsilon$  ou  $\mu$ -strain. Em relação ao tempo, este pode ser apresentado em horas ou dias.

**Figura 12.** Exemplo do gráfico de tensão de deformação x idade de fissura.



Fonte: Adaptado da ASTM C1581/C1581M (2016)

Para este trabalho foram utilizados os parâmetros e critérios da norma ASTM C1581:2016. O Quadro 3 apresenta alguns trabalhos da literatura.

**Quadro 3.** Principais trabalhos sobre ensaios com anel de restrição.

Referências	Objetivo	Metodologia	Resultados
Löfgren e Esping, 2006	Avaliar o potencial de fissuras e o nível de retração plástica do CAA nas primeiras horas (<24hs)	Comparar por meio do anel de restrição e ensaio da placa variados traços de CAA e comparar o grau de retração e fissuras com o concreto convencional.	O CAA apresentou maior taxa de fissuração e idade mais precoce quando comparado com convencional. Os CAAs com maior relação a/c, como por exemplo acima de 0,67 apresentaram maior área de trinca. os traços de CAA com adição de sílicas, variação do volume de argamassa, uso de aditivos e maior taxa de evaporação aumentaram significativamente a tendência a fissuração.
Rozière et al., 2007	Avaliar a influência do volume de argamassa no CAA em relação aos processos de retração e tendência a fissuração	O método do ensaio do anel de restrição e a elaboração de três misturas de CAA, sendo uma de referência e as outras duas com variação do volume de argamassa.	Os resultados segundo os autores são possíveis concluir que aumentar o volume de pasta aumenta a suscetibilidade à fissuração por retração. A relação a/c alta proporcionou uma tendência maior das fissuras devido ao processo de retração por secagem. Ainda segundo os autores a redução do volume de pasta e argamassa pode afetar a fluidez e as características no estado fresco do CAA. Contudo, pode ser considerado como uma maneira de reduzir a retração e o risco do surgimento de fissuras
Nassif, Aktas e Najm, 2011	Avaliar o potencial de fissuras em concretos de alto desempenho em diversos traços de concreto, e analisando a influência de materiais pozolânicos, sílicas	O molde do anel de aço segundo a AASHTO - PP 34:99, anel de aço possui um diâmetro interno de 279 mm (, um diâmetro externo de 305 mm e uma altura de 152,5 mm. A espessura da parede de concreto é de 75 mm. Para realizar a medição diária foram utilizados quatro strain gages de lâmina (FSG).	Segundo os resultados apresentados a idade média de fissura se apresentou por volta dos 14 dias. Outros pontos observados pelos autores após análise dos resultados a relação agregado graúdo interfere nas tensões de fissuras, quanto mais finos forem as adições maior pode ser o potencial de fissuras. Adições como sílicas e aditivos contribuem para o aumento de fissuras.
Eagelton, 2014	Avaliar os efeitos da retração e fissuração nas primeiras idades de concretos de alto desempenho.	Ensaio de anel com restrição seguindo os parâmetros estabelecidos pela norma AASHTO PP34:99 analisar a idade fissura de amostras de concreto submetidas em variáveis formas de cura e dosagem	Os resultados apresentados pelo autor destacam a influência do uso de aditivos e dos processos de curas como fatores que influenciam na retração e no surgimento de fissuras nas primeiras idades. A alta temperatura durante a cura tem um efeito muito mais significativo na idade precoce ganhando de força do que no aumento da retração. Embora estudos anteriores monitorem o teste de retração por mais de 56 dias, acredita-se que qualquer mistura que não se quebre dentro de 56 dias é considerada adequada para resistir ao potencial de fissuras.

**Continuação Quadro 3.** Principais trabalhos critérios frente ao estado da arte dos ensaios com anel de restrição

Referências	Objetivo	Metodologia	Resultados
Zhou et al., 2014	Avaliar surgimento de fissuras em peças de concreto por meio amostras elípticas.	Elaboração de amostras elípticas com restrição e um modelo numérico para analisar o desenvolvimento de tensões e a iniciação de fissuras em anéis de concreto nos quais o efeito da retração do concreto é simulado por uma queda de temperatura fictícia aplicada ao concreto, causando a mesma tensão induzida pelo encolhimento	Os principais resultados apresentados pelos autores destacam a validação do modelo numérico proposto para a análise do potencial de fissuras, a geometria do anel afetou diretamente na tensão interna no ensaio de anel com restrição. A amostra em formato elíptico apresentou uma maior restrição em um tempo menor de ensaio. Ao comparar resultados experimentais e numéricos, também se concluiu que a posição da fissura em anéis elípticos de concreto sujeitos a retração restringida pode ser prevista razoavelmente bem pelo modelo numérico proposto.
Nam et al., 2016	Avaliar a influência da adição de fibras de álcool polivinílico (PVA) e nylon como reforço no combate do surgimento de fissuras devido o processo de retração de concreto produzidos com agregados finos recicláveis.	Foram realizadas as amostras de concreto com agregado reciclado e agregado natural e foram adicionados na proporção de 0,05% e 0,1% de fibras em relação ao volume do concreto. Os ensaios foram utilizados os parâmetros e critérios estabelecidos pelas normas ASTM C1581:2016.	O concreto com adição de agregados finos reciclados apresentou uma maior taxa de retração e maior potencial de fissuras, a porosidade do agregado pode ter sido o fator de maior influência. Pode-se inferir que o reforço de fibras de uma pequena quantidade no RFAC contribuiu para melhoria na capacidade de ligação interfacial entre a matriz de cimento e o agregado. As fibras adicionadas em uma pequena fração de volume no RFAC com 100% de substituição de agregados finos são significativas para a redução de trincas na superfície.
Turcry et al., 2017	Avaliar a tendência de fissuração do CAA baseou-se em uma comparação das propriedades do material, como parâmetros de retração, módulo de elasticidade, fluência e fratura, variação de volumes de pastas entre misturas do CAA e do CCV.	Utilização de um anel metálico com raio interno de 85 mm, raio externo 110 mm, espessura e altura 70 mm. Foram realizados três grupos de misturas sendo de CAA e CCV. Variando o volume da pasta em cada mistura em 20%.	Os resultados encontrados pelos autores apresentam uma pequena diferença entre o módulo de elasticidade do CAA e do CCV, entretanto, em relação a retração o CAA apresentou uma variação muito maior quando comparado com CCV. Outros pontos destacados pelos autores é a idade de fissuras apresentas pelo CAA quando comparado com CCV, por meio do ensaio do anel de restrição foi possível observar que o CAA apresenta uma idade mais precoce de surgimento de fissuras. Fatores como propriedades dos materiais e volumes de argamassa são pontos que devem ser levados em consideração para a tendência de surgimentos de fissuras no CAA e CCV.

**Continuação Quadro 3.** Principais trabalhos critérios frente ao estado da arte dos ensaios com anel de restrição

Referências	Objetivo	Metodologia	Resultados
Niknezhad e Kamali-Bernard, 2016	Avaliar o processo de retração com restrição e o surgimento de fissuras do CAA com substituição parcial do cimento por de finos minerais (como escória de alto forno; cinzas volantes e metacaulim),	Utilizando os parâmetros estabelecidos pela AASHTO PP34:2006, propõem um molde de um anel de aço, foram elaborados quatro traços sendo: convencional com cimento Portland; Escória, Cinza volante e metacaulim.	Os principais resultados apresentados pelos autores destacam que nas primeiras idades os CAA com adição de escória de alto forno e de cinzas volantes apresentaram idades de fissuras precoces quando comparado com CAA de referência. O traço de referência fissurou por volta do 8º dia, outros traços variaram entre 3,5º a 6,56º dia. a abertura das fissuras nos CAAs com adições é pelo menos 1,57 vezes menor que a do CAA de referência. Substituir o cimento Portland por 15% de metacaulim envolve uma diminuição significativa no encolhimento total em 20% aos 40 dias.
Ehrenbring, Gil e Tutikian. (2018a) e Ehrenbring, Quirino e Tutikian, 2016	Avaliar a influência da adição fibras de poliéster novas e usadas na retração por secagem de concretos.	Ensaio ASTM C1581/C1581M a idade de fissura da produção de um concreto com a relação água-cimento de 0,60 e traço unitário de 1,0: 2,0: 2,5 (cimento: areia: brita), em massa. A mistura foi composta com teor de argamassa de 55% e contou com a adição de fibras de poliéster no teor de 0,30% do volume total de concreto utilizado em cada amostra	Os resultados encontrados para os concretos com adição de fibras recicladas de poliéster são superiores aos obtidos nos ensaios do concreto com fibras novas de poliéster. A adição de fibras recicladas de poliéster proporcionou redução, cerca de 80%, na formação de fissuras na matriz quando comparada aos efeitos de reforço em concretos com adição das fibras virgens.
Menu et al., 2017	Avaliar o potencial de fissuras e o comportamento de tração do concreto por meio do ensaio do anel com restrição	Anel com restrição segundo critérios AASHTO PP34:99 e na variação dos procedimentos de cura ao longo do ensaio. Procedimentos de cura dos anéis foram de 2 e 6 dias.	A cura úmida pode atrasar a fissuração de um elemento de concreto sob condições de retração restritas.

**Continuação Quadro 3.** Principais trabalhos critérios frente ao estado da arte dos ensaios com anel de restrição

Referências	Objetivo	Metodologia	Resultados
Onghero, 2017	Avaliar a influência das fibras de vibro na produção de concretos de alto desempenho (CAD) em relação ao combate a retração e fissuras	Realizou a produção de CADs com duas relações A/Agl (A/Agl) diferentes, sendo utilizado as relações de 0,25 e 0,32; e as adições de fibras ocorreram em teores de 0,20%; 0,25% e 0,30% do volume de concreto e o ensaio do anel com restrição de acordo com os parâmetros estabelecidos pela norma ASTM 1581:2009.	Segundo os resultados do autor foi possível notar que ao adicionar fibra, o concreto apresentou menor deformação. Entretanto o autor ressalta, que não foi observada diferença significativa entre as misturas quanto ao tempo necessário para a fissuração do concreto. Outra análise apresentada pelo autor se refere a influência de elevados teores de adição de fibras que podem comprometer a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto.
Monte, Barros e Figueiredo, 2018	Avaliar o efeito da adição de fibras de PP no combate ao surgimento de fissuras em argamassas	Foram utilizados dois tipos de argamassas para revestimento (com incorporador de ar e outro com cal hidratada) e três teores de fibras (0,1; 0,2; 0,3), para realizar o ensaio os autores produziram , quatro amostras com 25 mm de espessura e 70 mm de altura foram moldadas em torno de um anel de aço rígido com 305 mm de diâmetro interno	A amostra sem adição de fibras apresentou o surgimento de fissura no 4º dia e as amostras com adição de fibras PP apresentou o surgimento em média no 7º dia de ensaio. A redução da área de fissuras foi variou entre 63 e 84% para as argamassas com incorporador de ar, e de 26 a 95% para os traços com adição de cal hidratada.
Borges, Motta e Pinto, 2019	Avaliar o desempenho da adição de fibras vegetais (sisal e rami) e de polipropileno em relação a retração por secagem restringida do concreto convencional	Propuseram em sua metodologia a adição de 0,25 % e 0,5 % para as fibras vegetais e para a fibra de polipropileno o teor de 0,25 % e a avaliação da retração por secagem restringida baseou-se nas recomendações da ASTM C1581:2016	O concreto de referência apresentou idade de fissuração ao 6º dia de ensaio e o concreto com adição de fibra ao 4,5º dia de ensaio. Os concretos com 0,5 % de fibras apresentaram os melhores resultados. Entretanto para altos teores de fibras (0,5 % neste caso) se tem uma dificuldade na determinação da idade da ocorrência da fissuração. Os autores ressaltam também a importância de realizar mais ensaios a fim de se comprovar que a adição de teores menores que 0,25 % de fibras implicam na redução da resistência à fissuração do concreto

**Continuação Quadro 3.** Principais trabalhos critérios frente ao estado da arte dos ensaios com anel de restrição

Referências	Objetivo	Metodologia	Resultados
Sayahi et al., 2019	Avaliar o surgimento de fissuras por retração plástica no CAA por meio da relação entre a taxa de evaporação, a pressão capilar e a taxa de hidratação	Foram elaboradas pelos autores traços de CAA variando a relação a/c de 0,38, 0,45, 0,55 e 0,67 e por meio do ensaio de anel de restrição analisar a pressão capilar e a tendência a fissuração e parâmetros estabelecidos pela NORDTEST método NT BUILD 433:1995	As análises de resultados ressaltam que a alta taxa de acúmulo de pressão capilar pode aumentar o risco de fissuras quando acompanhada de alta evaporação. A relação a/c influencia diretamente na tendência da fissuração. Ainda segundo os autores, essa tendência tende a aumentar nas relações a/c acima de 0,55 devido a presença de grande quantidade de cargas, o que leva a um desenvolvimento mais rápido da pressão capilar. as fissuras do CAA com alta relação a/c está vinculada com a retração plástica e que a faixa ideal da relação a/c para diminuir o risco de rachaduras na idade precoce está entre 0,45 e 0,55

### 2.4.3. Análise estatística e correlações

A necessidade de estabelecer correlações que afetam as características dos materiais são metodologias utilizadas com o objetivo de entender quais as variáveis apresentam maior influência no resultado final, e para isso, se estabelece fatores numéricos (STANTON, 2001; SILVA et al., 2020).

As correlações podem ser entendidas de duas formas, as correlações lógicas, ou seja, casuais e de fácil compreensão e as correlações ilusórias, onde não ocorre nenhuma conexão entre as variáveis. As correlações também podem ser classificadas como simples, onde é analisado o grau de relação entre duas variáveis, havendo sempre uma variável dependente e uma independente; e a correção múltipla, onde é analisado a relação simultâneo linear entre uma variável ou um conjunto de variável (SILVA et al., 2020).

Uma das formas de encontrar a relação entre variáveis, é utilizar o cálculo de coeficiente de correlação linear de Pearson, onde sua variação deve ser situada entre os intervalos -1 e +1. O r igual a 1,0 ( $r = 1,0$ ) significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis. O r igual a -1 ( $r = -1,0$ ) significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma variável aumenta, a outra sempre diminui. O r igual a zero ( $r = 0$ ) expressa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra. No entanto, pode

existir uma outra dependência que seja "não linear". Assim, o resultado  $r = 0$  deve ser investigado por outros meios. A Tabela 7 apresenta os critérios para a classificação das correlações de acordo com análises de Stanton (2001), Figueiredo Filho e Silva Junior (2009) e Figueiredo Filho et al. (2014).

**Tabela 7:** Intensidade de correlação de acordo com o coeficiente de correlação PEARSON

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	uma correlação bem fraca
0,20 a 0,39	uma correlação fraca
0,40 a 0,69	uma correlação moderada
0,70 a 0,89	uma correlação forte
0,90 a 1,00	uma correlação muito forte

**Fonte:** Adaptado de Figueiredo Filho et al. (2014)

A análise de variância ou ANOVA é uma metodologia usada para comparar a distribuição de três ou mais grupos em amostras independentes, de forma que seja possível estabelecer uma regressão linear e, utilizando o teste F, testar a hipótese de que qualquer fonte de variação no modelo é igual a zero (REIS, PINTO e SOARES 2016).

Para estabelecer a validação dos ensaios e visando estabelecer uma coerência para reduzir a margem de erro e aumentar o nível de confiança dos resultados foi utilizado o teste de *Chauvenet* para aceitação ou rejeição dos resultados.

Segundo considerações apresentadas por Taylor (2012) e Ferreira (2017) o teste de *Chauvenet* tem como objetivo determinar se um valor amostral é discrepante em relação aos demais valores restantes da amostra, considerando uma distribuição normal.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados os ensaios de caracterização física dos materiais componentes do concreto, a produção dos concretos e argamassas e os ensaios nos estados fresco e endurecido.

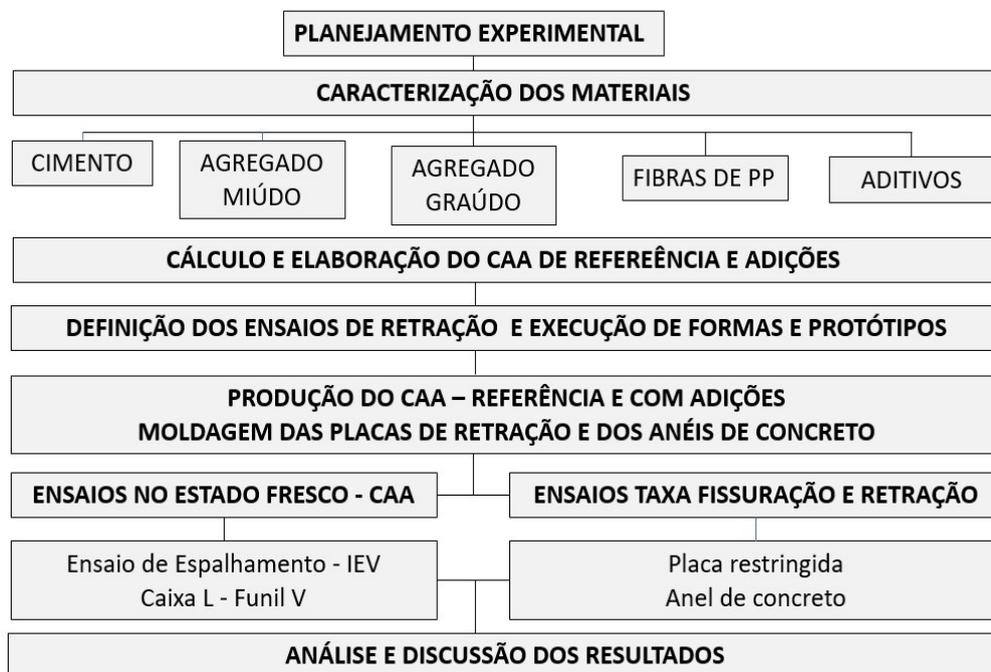
Os procedimentos experimentais foram desenvolvidos baseados nas normas técnicas da ABNT e ASTM.

A caracterização física dos materiais e os ensaios de retração e fissuração foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Faculdade de Tecnologia da UNICAMP em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia.

#### 3.1. Metodologia

Na Figura 13 pode-se visualizar o planejamento experimental da pesquisa.

**Figura 13.** Fluxo do planejamento experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para definição e elaboração do fluxo experimental, primeiramente foram analisados os materiais constituintes, suas características físicas e químicas e, principalmente,

suas granulometrias.

Para que fossem alcançadas as principais características do CAA no estado fresco, como coesão, fluidez e resistência à segregação, fez-se necessário o uso de maior quantidade de finos na elaboração dos traços.

Para a caracterização física dos agregados utilizou-se as seguintes normas brasileiras ABNT NBR NM 248:2003, ABNT NBR NM 52:2009, ABNT NBR NM 45:2006 e ABNT NBR 53:2009.

Após a caracterização física dos materiais secos e escolha do aditivo, procedeu-se à elaboração dos traços iniciais para a produção do CAA. Para a caracterização do CAA no estado fresco utilizou-se as especificações de acordo com a ABNT NBR 15823-1:2017, foram realizados os ensaios do índice de estabilidade visual (IEV) e ensaio de espalhamento conforme ABNT NBR 15823-2:2017 e ensaio do Funil V (ABNT NBR 15823-5:2017).

Para os ensaios de retração utilizou-se procedimentos descritos na norma ASTM C1579:2013 e ASTM C1581:2016.

### **3.2. Materiais Utilizados**

Empregou-se pó de brita proveniente da região do município de Campinas, estado de São Paulo. Para caracterizar fisicamente o agregado miúdo foram realizados os seguintes ensaios: massa específica (ABNT NBR 52:2009), massa unitária no estado solto e seco (ABNT NBR 45:2006), composição granulométrica (ABNT NBR 248:2003). Os resultados dos ensaios estão no capítulo 4.

Os materiais utilizados na fabricação do CAA foram: fibras de polipropileno, cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, aditivos superplastificantes, areia quartzosa (agregado miúdo), brita 0 (agregado graúdo), pó de brita, água (rede pública).

#### **3.2.1. Cimento Portland**

O cimento utilizado foi do tipo CP V por atingir alta resistência inicial nas primeiras idades, fator esse que, para o traço de CAA é o mais recomendado, devido as características de módulo de finura e calor de hidratação.

Na Tabela 8 estão as características físicas do cimento.

**Tabela 8:** Característica do cimento utilizados

<b>Características</b>	<b>Unidade</b>	<b>CP V -ARI</b>
Massa específica (ABNT NBR 16605:2017)	Kg/m <sup>3</sup>	3,15
Tempo de pega (ABNT NBR 16607:2018)		
Início	horas	≥ 1
Fim	horas	≤ 10
Resistência à compressão (fcj) (ABNT NBR 7215:2019)		
1 dia	MPa	27,5
3 dias	MPa	42,3
7 dias	MPa	46,8
28 dias	MPa	56

**Fonte:** Elaborado pelo autor

### 3.2.2. Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado é a base de éter policarboxilato. Tem a capacidade de aumentar a trabalhabilidade da mistura, mantendo íntegra as propriedades do material, como sua homogeneidade. Suas propriedades e características são apresentadas na Tabela 09.

**Tabela 9.** Propriedades do aditivo utilizado.

<b>Propriedades do Aditivo</b>	
Tipo de produto	Superplastificante
Densidade	1,09 g/cm <sup>3</sup>
Dosagem recomendada	0,2 a 5,0% do peso de cimento
Estado	Líquido
Cor	Marrom/Avermelhado

**Fonte:** Adaptado de Manual Técnico MC-Bauchemie (2015)

### 3.2.3. Fibras de Polipropileno

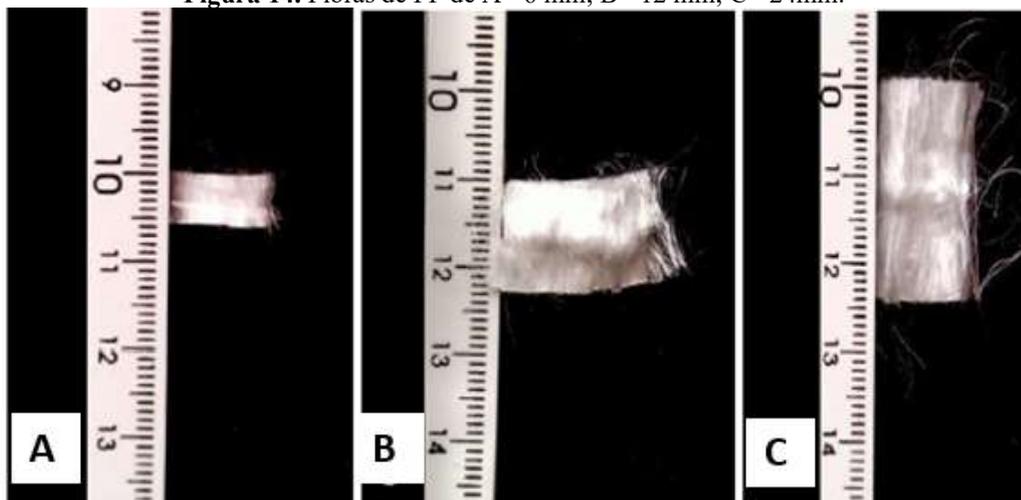
Foram utilizadas fibras poliméricas de polipropileno, com comprimento de 6, 12 e 24 mm, cujas características físicas estão apresentadas na Tabela 10 e na Figura 14.

**Tabela 10.** Propriedades das fibras de polipropileno

Propriedades	Tipo I	Tipo II	Tipo III
<b>Propriedades Físicas</b>			
Tipo de fibra	Microfibras	Microfibras	Microfibras
Comprimento (mm)	6	12	24
Diâmetro	21 $\mu$ m	21 $\mu$ m	21 $\mu$ m
Seção	Circular	Circular	Circular
Alongamento	80%	80%	80%
Relação de aspecto (L/D)	286	571	1143
Peso específico	0,91 g/cm <sup>3</sup>	0,91 g/cm <sup>3</sup>	0,91 g/cm <sup>3</sup>
<b>Propriedades Mecânicas</b>			
Temperatura de fusão	160°C	160°C	160°C
Temperatura de ignição	365°C	365°C	365°C
Resistência à tração (GPa)	0,3	0,3	0,3
Módulo de elasticidade (GPa)	3	3	3

Fonte: Adaptado de Manual Técnico Maccaferri (2017)

**Figura 14.** Fibras de PP de A - 6 mm; B - 12 mm; C - 24mm.



Fonte: Autor (2018)

Para que a mistura fique homogênea é sugerido o tempo de mistura de cinco minutos após a adição das fibras. Quanto ao teor a ser adicionado, segundo EFNARC (2010), as fibras sintéticas muito finas podem impedir o fluxo e geralmente o teor não deve exceder 1 kg/m<sup>3</sup>.

### **3.3. Definição dos Ensaios de retração e elaboração de protótipos e fôrmas para ensaios de retração e fissuras**

Após a conclusão da revisão do estado da arte sobre ensaios de retração definiu-se as metodologias e normas para a elaboração do trabalho experimental.

Para determinar o potencial do surgimento de fissuras do CAA/Argamassa e analisar a contribuição da adição das fibras de PP optou-se pelo ensaio de placa com restrição e os critérios da ASTM C1579:2013. Para a retração do CAA/Argamassa e a idade média do surgimento das fissuras optou-se pelo ensaio do anel de restrição e critérios da ASTM C1581:2016.

Para ambos os ensaios foi proposto uma alteração nas fôrmas, áreas e volumes do CAA/Argamassa e verificado o nível de correlação existente entre os ensaios.

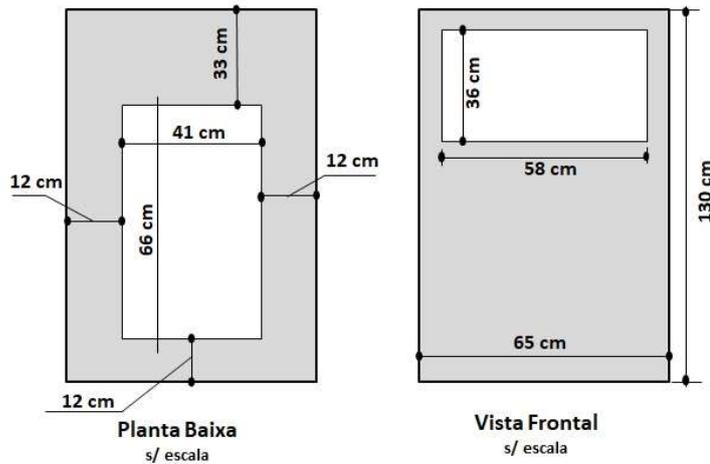
#### **3.3.1. Avaliação do potencial de fissuração por meio do ensaio de placas com restrição – ASTM C1579:2013**

Para a execução dos ensaios, foram desenvolvidos protótipos que potencializaram o surgimento de retrações plásticas e/ou por secagem. Os protótipos apresentaram controles de umidade, temperatura, visando acelerar o processo de evaporação.

##### **3.3.1.1. Elaboração do protótipo para ensaio de fissuração**

O protótipo do referido ensaio foi constituído de estrutura metálica e revestimento de chapa metálica galvanizada, na dimensão de 65 cm de largura, 110 cm de comprimento e 130 cm de altura, baseando-se nos conceitos e critérios da ASTM C1579:2013, conforme apresentado na Figura 15.

**Figura 15.** Projeto esquemático do protótipo proposto, adaptação da ASTM C1579:2013.

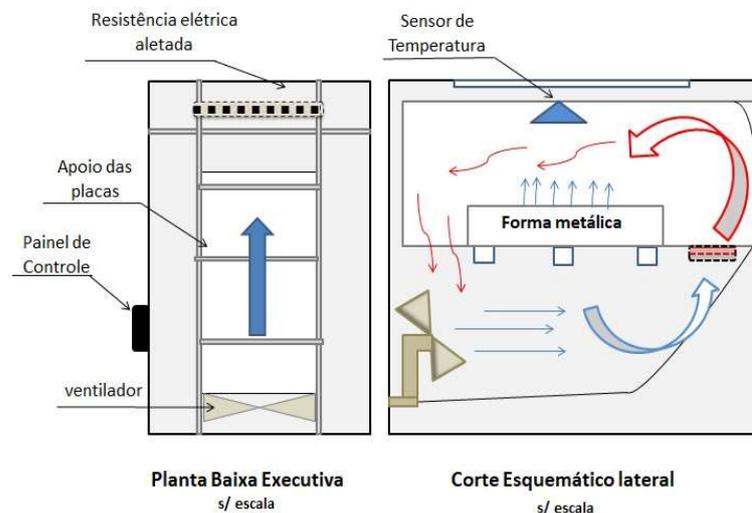


Fonte: Elaborado pelo autor

O objetivo do ensaio é promover um ambiente de controle e fluxo de secagem e evaporação das placas de concreto. Para isso, foi instalado um ventilador com velocidade variável para simular o vento, para que se fosse garantido a mínima taxa de evaporação de  $1,0 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{h}$  e uma resistência elétrica aletada com dissipadores de calor de  $1200\text{W}$  e  $220\text{V}$ , para que fosse estabelecido o valor de temperatura. Foram instalados também, sensores de temperatura e de umidade, para que fosse garantido um melhor controle dos parâmetros.

A Figura 16 apresenta, de forma esquemática, a montagem do sistema. Para o controle de temperatura e umidade foram instalados um Controlador Temperatura Digital Termostato  $110 / 220\text{volts}$ , além de instalados sensores do tipo sensor de umidade e temperatura SHT20 com encapsulamento IP65.

**Figura 16.** Projeto esquemático do processo de ensaio de retração.



Fonte: Elaborado pelo autor

As figuras 17 e 18 apresentam o protótipo executado e seus respectivos detalhes externos e internos.

**Figura 17.** Protótipo para ensaio de retração – Detalhe A controle de temperatura e vento.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

**Figura 18.** Detalhe interno da caixa para ensaio de retração.



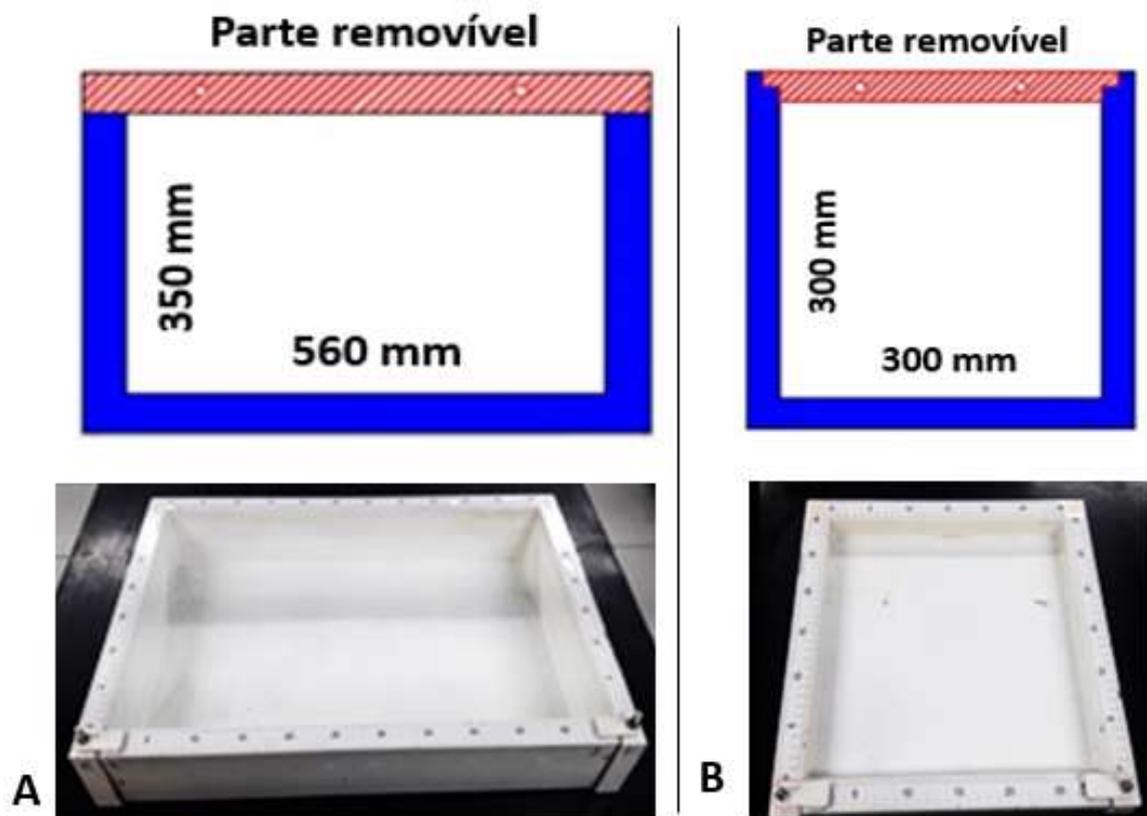
**Fonte:** Elaborado pelo autor

### 3.3.1.2. Fôrmas metálicas para ensaios de placas e restrição

Para a execução dos ensaios em placas, estabeleceram-se duas dimensões de placas, sendo uma na dimensão de 560 mm x 350 mm x 50 mm (comprimento x largura x altura) conforme estabelecido na ASTM C1579:2013 e uma outra placa quadrada proposta neste trabalho na dimensão de 300 mm x 300 mm x 50 mm (comprimento x largura x altura).

Todas as placas foram produzidas em material metálico com o objetivo de reter o máximo de água no processo de hidratação do cimento. Conforme apresentado na Figura 19, as fôrmas foram produzidas com três lados fixos e um lado removível para facilitar a desforma da peça.

**Figura 19.** Projeto das fôrmas metálicas para ensaio de placas com restrição, A - placa 560x350 mm (ASTM C1579:2013); B - placa 300x300 mm (proposta autor).

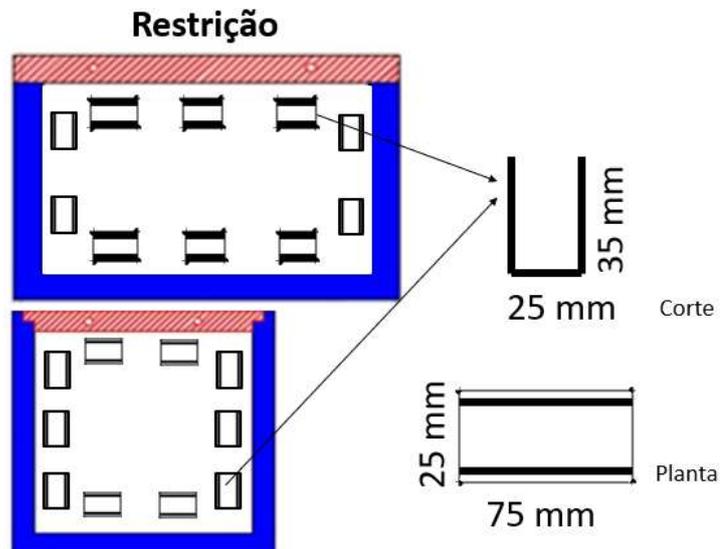


Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.1.3. Definição das restrições internas

Com o objetivo de caracterizar e criar um sistema de indução de fissuras nas placas de CAA, foi estabelecido um sistema de restrição que mais contribuiu para o surgimento de fissuras, de restrição perimetral, de acordo com Barluenga e Hernández-Olivares (2007) e Silva (2018). As Figuras 20 e 21 apresentam o sistema de restrição do ensaio da placa. Foram fixados dentro das fôrmas peças metálicas com seção em “U” posicionadas internamente de medida 25 x 35 x 75 mm para efeito de restrição interna com espaçamento de 50 mm da face da forma.

**Figura 20.** Sistema de restrição formato “U”.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 21.** Fôrmas com o sistema de restrição para induzir as fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

### **3.3.2. Avaliação da retração e da idade de fissuração – ASTM C1581:2016**

Para a execução do ensaio de retração e a previsão da idade de fissuras optou-se pelo ensaio do anel com restrição e critérios da norma ASTM C1581:2016. Foram elaborados dois tipos de anéis, um seguindo exatamente os parâmetros da norma e um outro anel em um tamanho menor proposto pelo autor.

O objetivo da redução da dimensão do anel foi verificar se existem correlações direta com o formato do anel, volume de CAA e a idade média das fissuras e propor um anel para uso exclusivo no ensaio de retração do CAA.

#### **3.3.2.1. Elaboração do protótipo para o ensaio de retração**

O referido protótipo teve como objetivo, analisar a retração do CAA/Argamassa e a idade média das fissuras. O ensaio tem como base os critérios apresentados na ASTM C1581:2016.

Os anéis foram executados em material metálico e revestidos com uma pintura para evitar pontos de corrosão. A base foi fabricada em madeira reforçada e revestimento com acrílico para evitar a absorção da água de hidratação no processo de secagem e evitar a aderência para não prejudicar o ensaio.

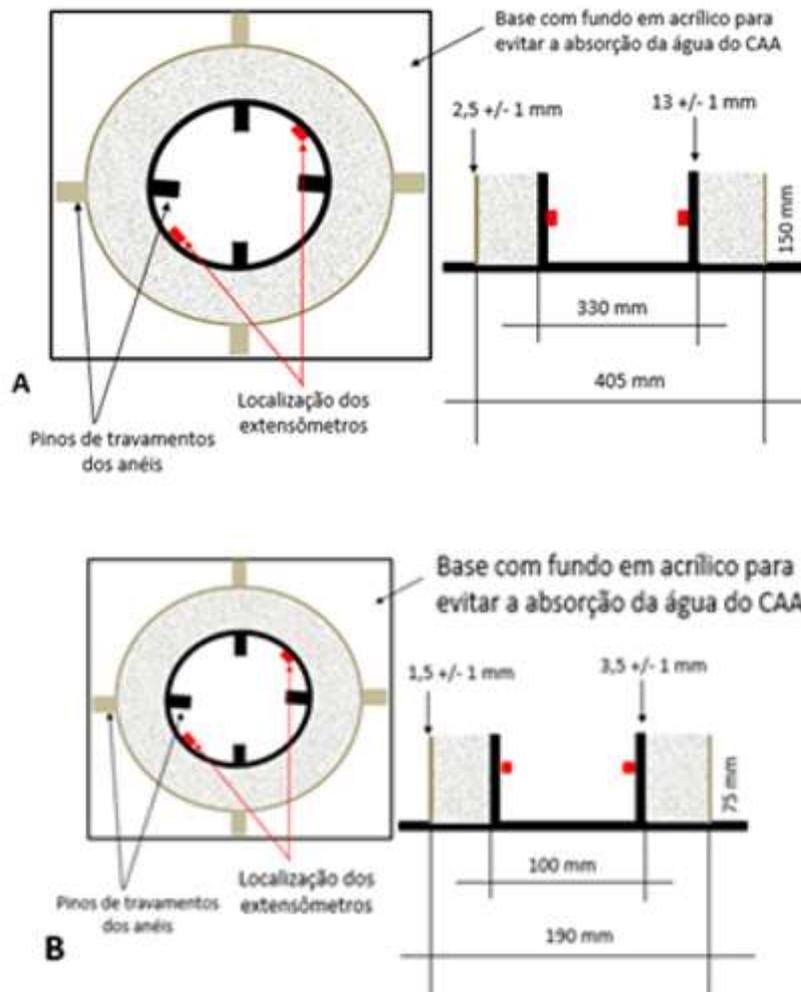
Para a fixação do anel na placa foram utilizados parafusos com diâmetros de 8 mm com porcas e arruelas como sistema de fixação.

Os anéis foram nivelados com nível de bolha e apoiados em uma mesa fixa para a moldagem, evitando assim qualquer movimentação externa e interferência nas medições.

A cada moldagem e finalização dos ensaios, os anéis eram limpos fazendo toda a remoção dos resíduos de concreto e argamassa, depois foi aplicado desmoldante para facilitar a desfôrma.

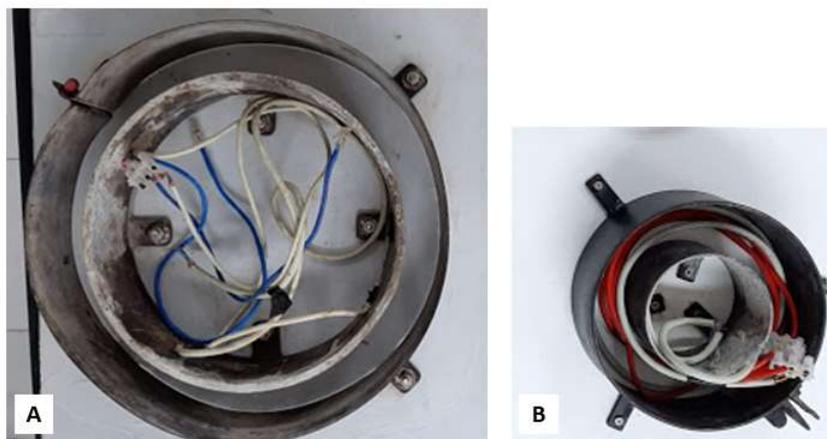
As dimensões técnicas do projeto de elaboração dos anéis, tais como as espessuras e detalhes técnicos são apresentados na Figura 22. A Figura 23 apresenta os protótipos concluídos.

**Figura 22.** Projeto dos anéis metálicos para ensaio de retração, A - anel de acordo com ASTM C1581:2016; B - anel metálico de acordo com a proposta autor.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 23.** Anéis metálicos para o ensaio de retração, A - anel de acordo com ASTM C1581:2016; B - anel metálico de acordo com a proposta autor.

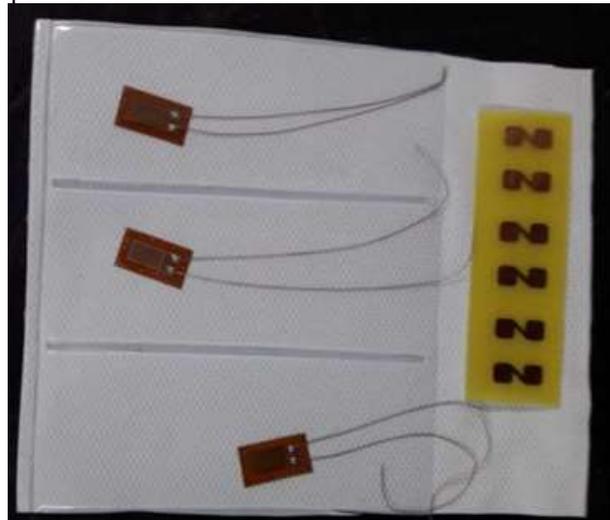


Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.2.2. Instalação dos extensômetros e aquisição dos dados

Para realizar a medição da deformação do anel e analisar a média da idade das fissuras foram utilizados extensômetros (*strain gage*) de  $120\Omega$  com fio de cobre soldados e encapsulado, como apresentado na Figura 24.

**Figura 24.** Exemplo dos extensômetros de  $120\Omega$  com fio de cobre soldados e encapsulado.



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram instalados dois extensômetros no centro da face interna, do anel interno, em relação à altura e um em cada extremidade. A Figura 25 apresenta onde foi alocado os extensômetros. Para que não houvesse nenhum tipo de interferência por deformação no aço, foi lixado um raio de 20 mm até ficar totalmente uniforme e sem riscos profundos.

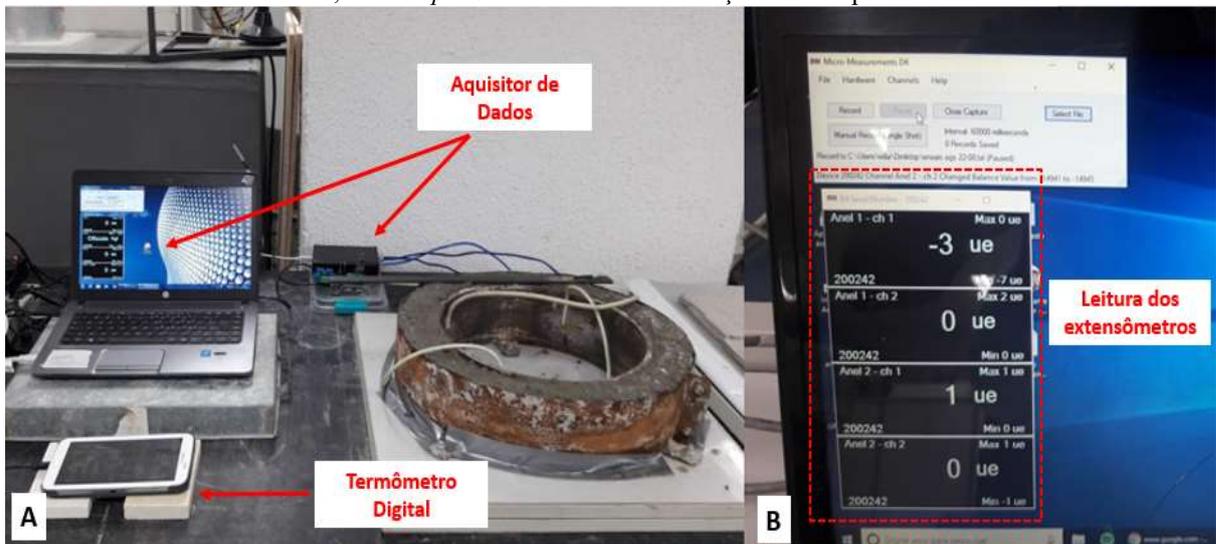
**Figura 25.** Metodologia para a instalação dos extensômetros; A - Processo de lixamento do anel; B - Área para colagem dos extensômetros; C - Fixação do extensômetro (centro do anel); D - Detalhe da fixação (aproximada).



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 26 apresenta o conjunto completo de instalações para a realização dos ensaios de retração e idade média de fissuras do CAA e da argamassa segundo os critérios da norma ASTM C1581:2016. O conjunto foi colocado em um lugar fixo para se evitar qualquer tipo de variação. Um termômetro digital realizou a medição da temperatura e da umidade do ar no momento do ensaio.

**Figura 26.** Metodologia para o ensaio do anel com restrição: A - Conjunto de instalação para ensaio de retração e idade de fissura; B - *Template* da leitura da deformação medida pelos extensômetros.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.4. Cálculo das dosagens do CAA e da Argamassa

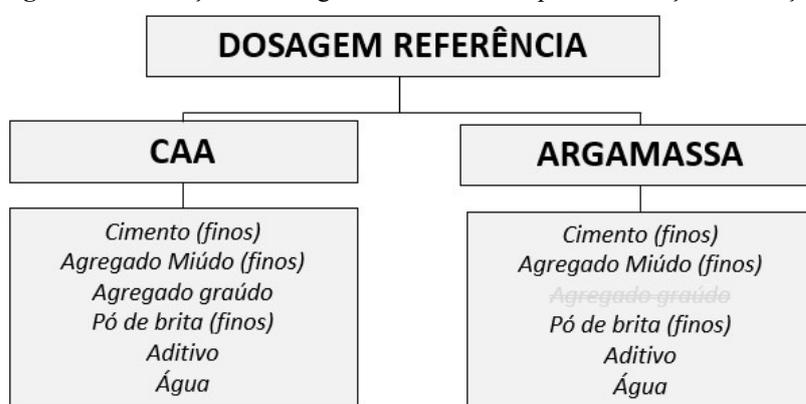
#### 3.4.1. Composição do CAA e argamassa de referência

A dosagem experimental após a caracterização de todos os materiais constituintes do CAA e da argamassa (ARG) baseou-se nos princípios de dosagem proposto por Tutikian e Dal Molin (2015). O procedimento foi realizado da seguinte forma:

- Especificação do diâmetro máximo do agregado graúdo, menor de 19 mm;
- Definição dos finos (areia fina, pó de brita,);
- Definição do teor ideal de argamassa seca;
- Definição do aditivo superplastificante;
- Definição do traço final.

A Figura 27 apresenta a definição dos traços de CAA (CAARF<sub>0</sub>) e da argamassa de referência (ARGRF<sub>0</sub>). A definição da argamassa de referência nesta pesquisa baseou-se simplesmente na remoção do agregado graúdo, sem alterar nenhum outro valor, ou seja, todas as quantidades de materiais finos foram exatamente iguais ao traço do CAA como apresentado na Tabela 11. Para a classificação no estado endurecido também foram realizados no traço CAARF<sub>0</sub> os ensaios de resistência à compressão axial segundo a ABNT NBR 5739:2018 e o ensaio do módulo da elasticidade ABNT NBR 8522:2017.

**Figura 27.** Definição da dosagem e dos materiais para elaboração dos traços.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

**Tabela 11.** Traços, em massa, do CAA e da Argamassa de referência.

Traço de Referência	Cimento CP V	Agregado Miúdo	Pó de Brita	Agregado Graúdo	Aditivo	a/c
CAARF <sub>0</sub>	1	1,45	1,28	1,05	1%	0,65
ARGRF <sub>0</sub>	1	1,45	1,28	0	1%	0,65

### 3.4.2. Composição do CAA e da argamassa com adições de fibras

Aarthi e Arunachalam (2017), Kumar, Rao e Kumar (2017), Silva (2018), recomendam os teores de 0,05% a 0,30% de fibras em relação ao volume do compósito.

As pesquisas de Yehia et al. (2016) e Elaty e Ghazy (2017) recomendam uma porcentagem mais elevada, de 0,25% a 0,75% mas, de acordo com EFNARC (2010) e a partir de experimentos pilotos em laboratório, constatou-se que as fibras sintéticas podem impedir o fluxo, descaracterizar as propriedades do CAA e por isso devem ser utilizadas com limitações.

Considerações apresentadas por Metha e Monteiro (2014) ressaltam que para estudos

que visam analisar a influência das fibras no combate ao surgimento de fissuras recomenda-se a adição menor que 1% em relação ao volume do concreto. Borges, Motta e Pinto (2019) destacam a necessidade de mais estudos voltados a porcentagem mais baixas de fibras no concreto.

Diante do exposto, para esta pesquisa, determinou-se os seguintes teores de fibras: 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% em relação ao volume total de concreto. A Tabela 12 apresenta o teor de adição de fibras e número de amostras para os ensaios de retração medidos em placas e em anéis.

**Tabela 12:** Apresentação da nomenclatura, teor de adição de microfibras de PP, número de placas e anéis por traço.

Traços	Teor de Adição	Placas		Anel	
		Segundo Norma ASTM	Proposta do autor	Segundo Norma ASTM	Proposta do autor
CAARF <sub>0</sub> - ARGRF <sub>0</sub>	0,0%	4	4	2	2
CAARF <sub>6</sub> - ARGRF <sub>6</sub> - 6 mm	0,05%	4	4	2	2
	0,10%	4	4	2	2
	0,15%	4	4	2	2
	0,20%	4	4	2	2
CAARF <sub>12</sub> - ARGRF <sub>12</sub> - 12 mm	0,05%	4	4	2	2
	0,10%	4	4	2	2
	0,15%	4	4	2	2
CAARF <sub>24</sub> - ARGRF <sub>12</sub> - 24 mm	0,20%	4	4	2	2
	0,05%	4	4	2	2
	0,10%	4	4	2	2
	0,15%	4	4	2	2
	0,20%	4	4	2	2

Onde:

CAARF – Concreto autoadensável reforçado com fibras

ARGRF – Argamassa reforçada com fibras

**Fonte:** Elaborado pelo autor

### 3.5. Produção e ensaios no estado fresco dos CAA e das argamassas, e moldagem das placas e anéis

#### 3.5.1. Produção e ensaios no estado fresco do CAA

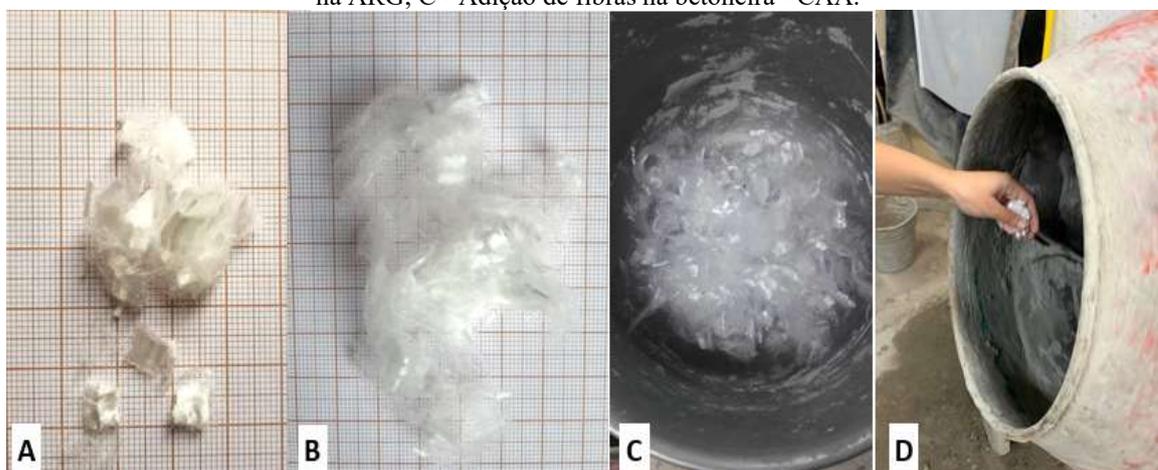
Os ensaios do CAA de referência e com adições foram realizados em parceria com a Universidade Federal de Uberlândia/MG.

Para a mistura dos materiais, seguiram-se as prescrições da ABNT NBR 12821:2009. O processo de mistura, em betoneira de eixo inclinado previamente umedecida, ocorreu da seguinte forma: primeiramente introduziu-se o agregado gráudo convencional, em seguida, a água proveniente da rede pública, na sequência, o cimento Portland de alta resistência inicial seguido da areia, pedrisco e pó de brita. Em seguida houve a mistura dos materiais na betoneira por aproximadamente, cinco minutos. Logo após introduziu-se o aditivo superplastificante, ocorrendo uma nova mistura por três minutos.

Após o término do processo de amassamento do concreto, foi observado que a mistura cimentícia apresentou-se coesa, sem serem observados os fenômenos de segregação e exsudação entre os materiais e com as características visuais de um CAA.

Para os traços com adição de fibras, primeiramente foram separadas manualmente com o objetivo de proporcionar uma melhor distribuição no processo de mistura, e depois foram adicionadas na betoneira, como mostrado na Figura 28.

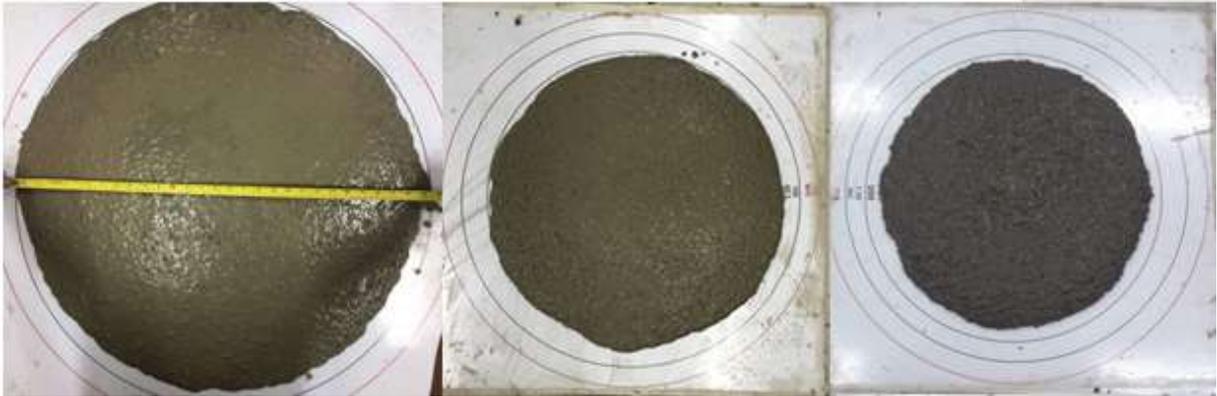
**Figura 28.** A – Empacotamento das fibras originais; B - Fibras separadas manualmente; C - Fibras adicionadas na ARG; C - Adição de fibras na betoneira - CAA.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a verificação da qualidade e dos requisitos mínimos do CAA no estado fresco foram realizados os ensaios: índice de estabilidade visual e ensaio de espalhamento (ABNT NBR 15823-2:2017) e ensaio do Funil V (ABNT NBR 15823-5:2017). A Figura 29 apresenta exemplo dos ensaios e na Figura 30 é apresentado o ensaio de fluidez e viscosidade de acordo a NBR 15823-5:2017.

**Figura 29.** Exemplos dos ensaios de espalhamento e índices de estabilidade visual.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 30.** Determinação da viscosidade – Método do funil V.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.5.2. Produção e ensaios no estado fresco das Argamassas

Para a realização do processo de produção das argamassas, foi utilizado uma argamassadeira com capacidade de cinco litros conforme as seguintes etapas:

1ª Etapa – Adição de 100% do agregado miúdo;

2ª Etapa – Adição de 100% do pó de brita (para uma melhor mistura o pó de brita foi misturado anteriormente com o agregado miúdo);

3ª Etapa – Adição de 100% do cimento;

4ª Etapa – Ligou-se a argamassadeira em baixa velocidade por 1 minuto e em seguida adicionou-se 50% da água e aumentou-se a velocidade;

5ª Etapa – Após 4 minutos, desligou-se a argamassadeira e manualmente desgrudou-se o material das bordas e adicionou-se o restante da água;

6ª Etapa – Ligou-se novamente a argamassadeira, a qual foi mantida em alta velocidade por mais 5 minutos, sendo adicionando o aditivo até completar 10 minutos de todo processo.

Nos traços com fibras, as fibras foram adicionadas após a etapa 5, visando apresentar uma maior distribuição das fibras. A Figura 31 mostra a execução do processo.

**Figura 31.** a) Adição agregados miúdos (areia + pó de brita); b) Adição do cimento; c) Adição da água; d) Mistura da argamassa.

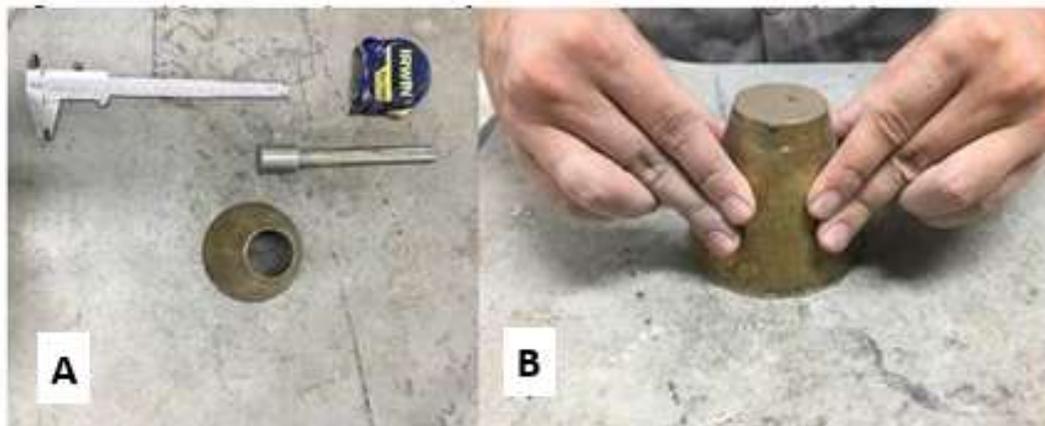


Fonte: Elaborado pelo autor

Tanto os traços de argamassa de referência como aqueles com adição de fibras foram submetidos ao ensaio de mini-slump (mini-abatimento) desenvolvido por Kantro (1980) e critérios estabelecidos pela ASTM C1437:2007. Considerações apresentadas por Raucci et al. (2018) ressaltam que o mini-abatimento é adotado em algumas pesquisas

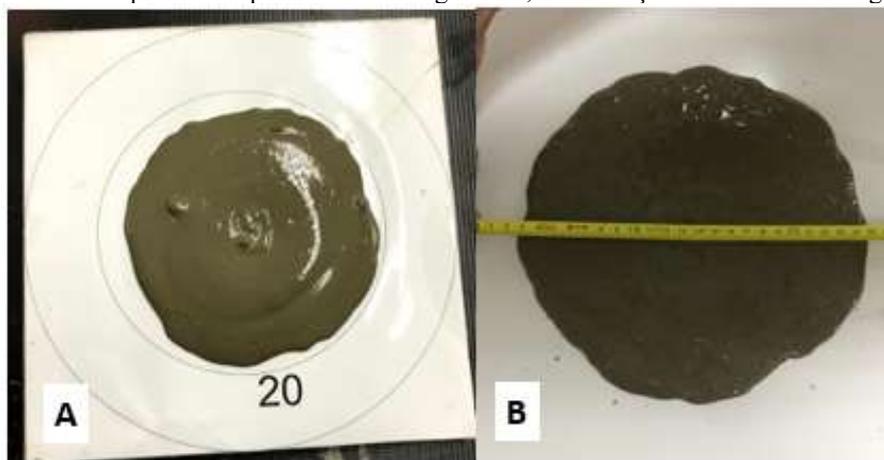
nacionais e internacionais para a determinação da consistência de pastas de cimento com aditivos superplastificantes (Figuras 32 e 33).

**Figura 32.** A - Materiais para execução do ensaio de mini-abatimento; B - Realização do ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 33.** Exemplos A - Espalhamento da argamassa; B - Medição do diâmetro da argamassa.



Fonte: Elaborado pelo autor

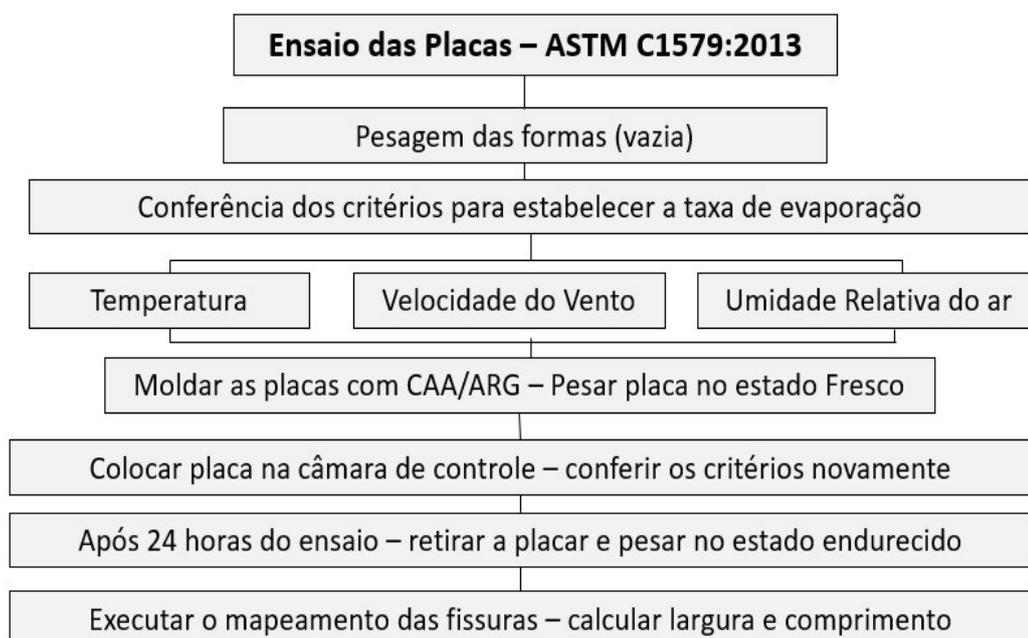
### 3.5.3. Moldagem das placas e dos anéis

Após a produção dos CAA e das argamassas no estado fresco, foram realizados os ensaios para medir o potencial de fissuras (placas) e a idade média das fissuras (anéis).

Os ensaios das placas foram realizados em dois tamanhos sendo uma placa segundo os parâmetros da norma ASTM 1579:2013, com dimensão de 560 mm x 350 mm x 50 mm (comprimento x largura x altura) e uma outra placa proposta pelo autor, com dimensão de 300 mm x 300 mm x 50 mm (comprimento x largura x altura). Foram realizadas quatro

amostras em cada placa por traço de CAA e argamassa. A metodologia para a realização dos ensaios das placas é apresentada na Figura 34.

**Figura 34.** Fluxo da moldagem e metodologia para os ensaios das placas com restrições.



Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente todas as placas foram pesadas vazias e identificadas, e estabelecido um ambiente que induzisse o surgimento de fissuras em um curto período de tempo. Foram seguidas as especificações das ASTM-C 1579:2013, ACI - 305R-10, ACI - 308-92 e Concrete Q&A (2007) para a temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar, que estabelece uma taxa de evaporação acima  $0,51 \text{ kg/m}^2/\text{h}$  para a probabilidade do surgimento de fissuras em peças de concreto. Para o respectivo ensaio, estabeleceu-se uma temperatura média de  $36 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $46 \pm 1\%$  para a umidade relativa (UR) e velocidade do vento constante de  $2,5 \pm 1 \text{ m/s}$ , medido cinco centímetros acima da placa durante todos os ensaios realizados. Para a medição da velocidade do vento foi utilizado Anemômetro Digital Medição Vento Drone Paraglider Kitesur.

Foram utilizados Termostato com controle de temperatura na câmara de controle, termômetro digital para verificação da temperatura e UR externa, termômetro digital a laser e câmera termográfica térmica modelo HT02 - Fluke Hti -  $20^\circ\text{C}$  a  $300^\circ\text{C}$  da marca Fluke, para medir a temperatura do concreto em seus diversos estados. Para o controle e medição da simulação de vento foi utilizado o anemômetro digital. As Figuras 35 e 36 apresentam os

equipamentos utilizados.

**Figura 35.** A - Termostato com controle de temperatura para ensaio da ASTM C 1579:13; B - Termômetro digital para verificação da temperatura e umidade relativa do ar externa; C - Anemômetro digital para medição da velocidade do vento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

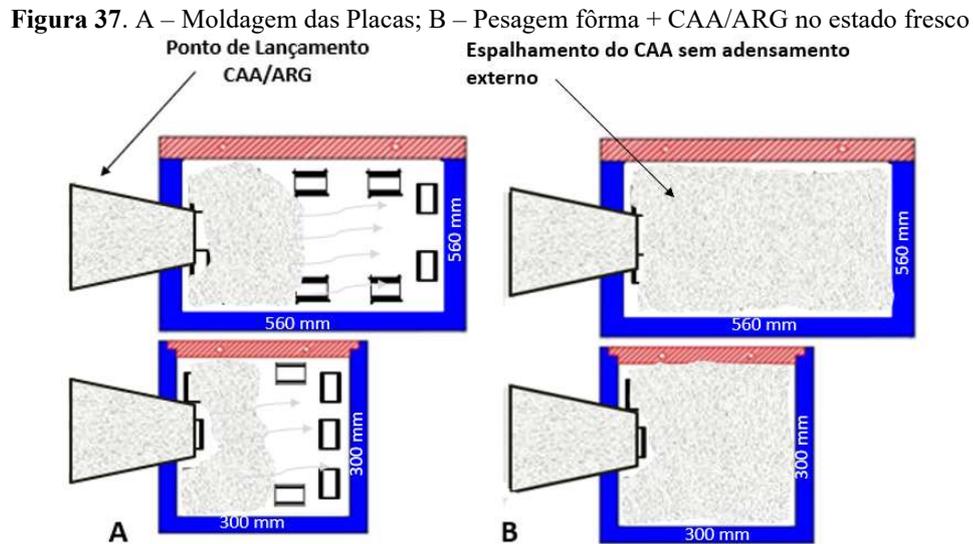
**Figura 36.** A - Termômetro a laser; B - Câmera termográfica para medir variação de temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

Após aplicado desmoldante nas fôrmas e medida a temperatura, a velocidade do vento e a umidade relativa do ar, foram moldadas as placas dos CAA e das argamassas e, em seguida, as fôrmas foram novamente pesadas. Por se tratar de um CAA estabeleceu-se um

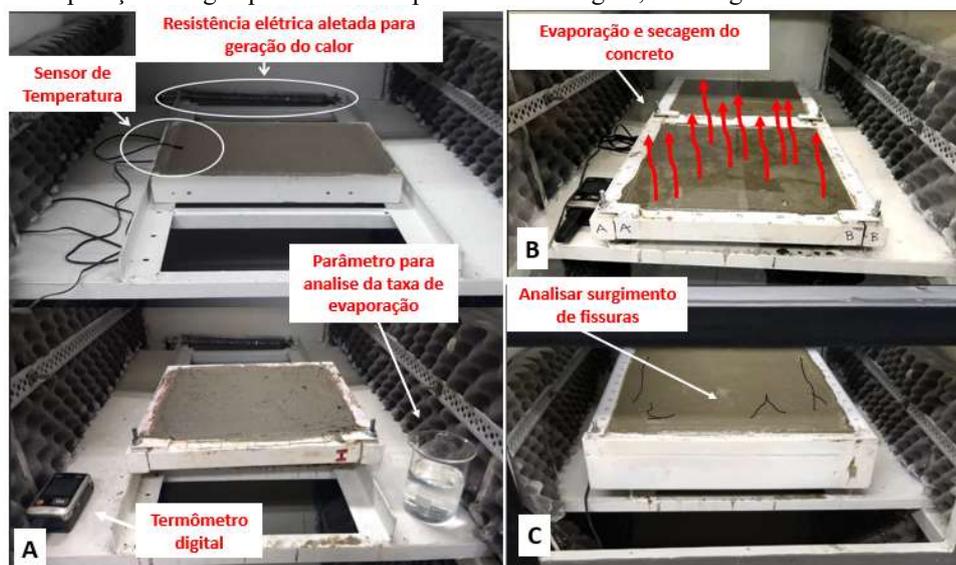
ponto fixo de lançamento da mistura, até o CAA preencher a fôrma por completo. O procedimento de moldagem das placas pode ser observado na Figura 37.



Fonte: Elaborado pelo autor

Logo em seguida as placas de concreto foram colocadas dentro da câmara de controle, iniciando assim os ensaios de fissuração. A Figura 38 apresenta a metodologia do ensaio de fissuração segundo os critérios da norma ASTM C1579:2013.

**Figura 38.** Metodologia do ensaio de indução de surgimento de fissuras segundo os critérios da norma ASTM C1579:2013; A - identificação dos sensores de medição e resistência aletada para geração do calor interno; B - Evaporação da água para acelerar o processo de secagem; C - Surgimento de fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

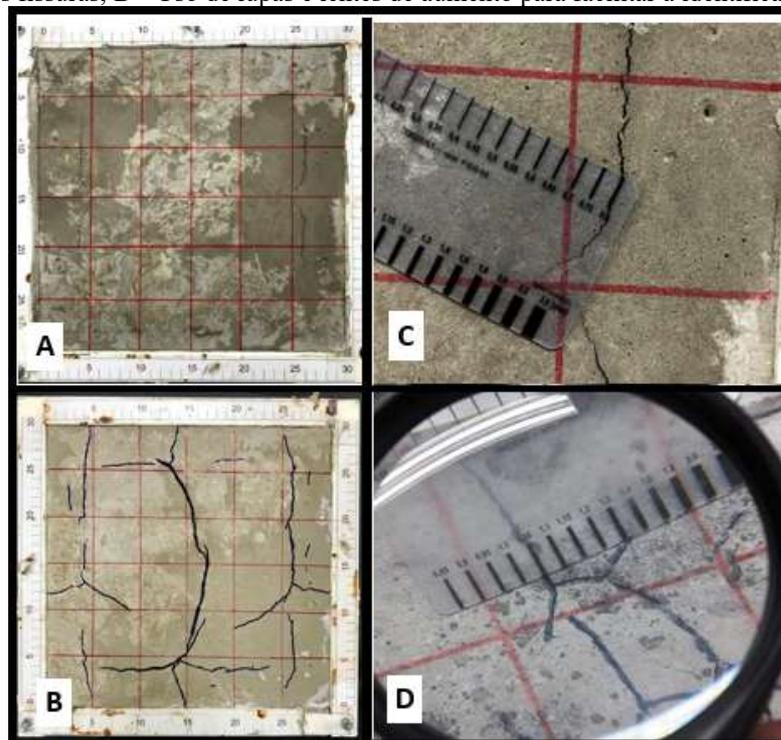
Passado o período de 24 horas do ensaio, as placas foram retiradas da câmara de controle e pesadas novamente para verificar a perda de massa por secagem. Em seguida realizou-se o mapeamento das fissuras calculando a largura médias e seu comprimento. Para isso foi utilizado paquímetro digital, lupa para facilitar a identificação e a régua de fissuras. Os resultados foram transformados em áreas médias de fissuração. O objetivo foi verificar se as fibras proporcionaram redução nas áreas de fissuras. A Figura 39 demonstra o procedimento de medição. Para o cálculo da área de fissuras, utilizou-se a Equação 02.

$$\text{Área}_F = \sum (\text{largura da fissura} \times \text{comprimento da fissura}) \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$\text{Área}_F$  = área da fissura

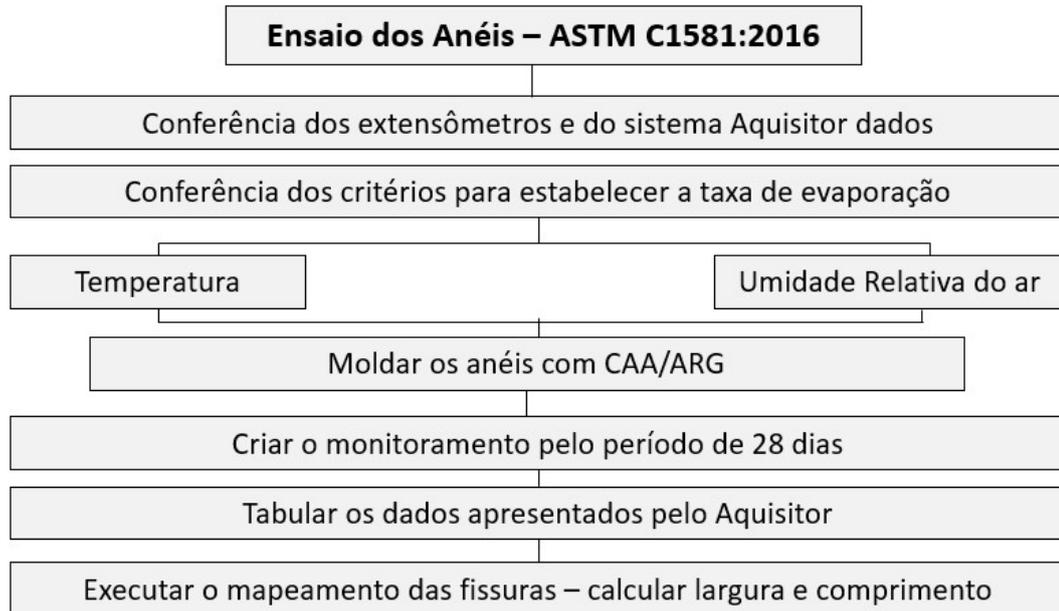
**Figura 39.** Metodologia para identificação e medição das fissuras; A - Mapeamento para facilitar a identificação das fissuras; B - Identificação individual das fissuras; C - Utilização da régua fissuromêtro para calcular a largura das fissuras; D - Uso de lupas e lentes de aumento para facilitar a identificação.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao ensaio do anel de restrição estabeleceu-se os critérios da norma ASTM C1581:2016. Foram elaborados dois anéis como apresentado anteriormente. A Figura 40 apresenta o fluxo para a moldagem dos anéis.

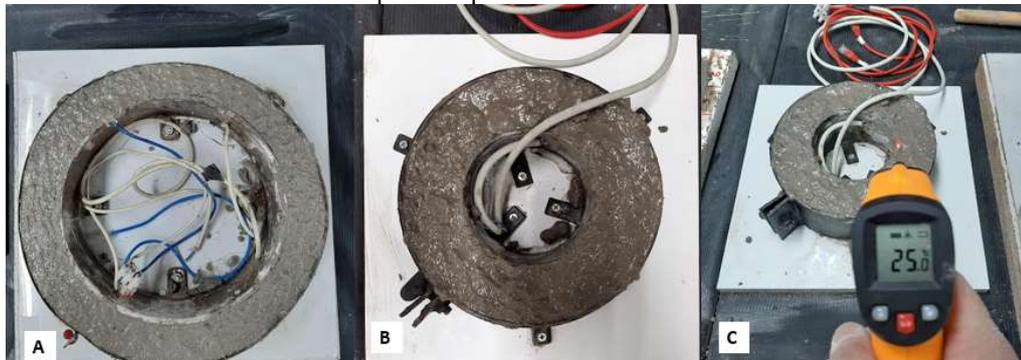
**Figura 40.** Fluxo da moldagem e metodologia para os ensaios dos anéis com restrição.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Com o aquisitor de dados configurado e validado, foram moldados os anéis de CAA e das argamassas conforme apresentado na Figura 41. Logo após a moldagem foi conferida a temperatura dos CAA e das argamassas utilizando um termômetro a laser para estabelecer a variação das informações e manter os mesmos critérios em todos os ensaios. Estabeleceu-se um ambiente com temperatura média de  $30\pm 1^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa do ar de  $62\pm 1\%$ . Não houve nenhum procedimento de cura ao longo dos ensaios.

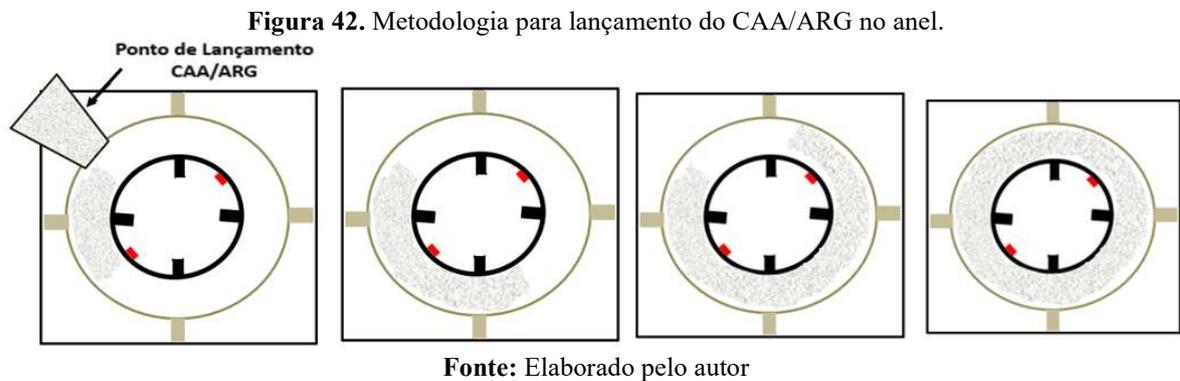
**Figura 41.** A – Moldagem do anel de CAA; B - Moldagem do anel de CAA com a proposta de redução; C – Leitura da temperatura por meio do termômetro a laser.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Antes da moldagem foi aplicado desmoldante na fôrma para facilitar a desforma dos anéis. A moldagem iniciou e se manteve em um ponto fixo do anel e por se tratar de CAA não houve adensamento manual e nem necessidade de variação do ponto de lançamento. O

mesmo procedimento foi adotado na moldagem dos anéis com argamassa. A Figura 42 mostra a metodologia de moldagem dos anéis.



Decorrido o período de 24 horas de moldagem dos anéis as fôrmas externas foram removidas para estabelecer apenas o anel interno como restrição. O ensaio foi realizado por 30 dias ininterruptamente. As medições dos extensômetros (deformação do anel  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) foram programados para medir minuto a minuto. De acordo com a norma ASTM C1581:2016 uma diminuição brusca da deformação em um ou ambos os extensômetros indicam a probabilidade do surgimento de fissuras.

Após a tabulação dos dados foi gerado o gráfico da deformação do anel ( $\mu\text{m}/\text{m}$ ) *versus* idade de fissuração em dias. Uma queda significativa da tensão pode apresentar uma fissura/rachadura no anel do CAA e das argamassas e o surgimento da fissura. Para realizar a medição das fissuras foi utilizado a régua de fissuras, paquímetro digitas e lupas para facilitar a identificação. A Figura 43 apresenta a metodologia da medição.



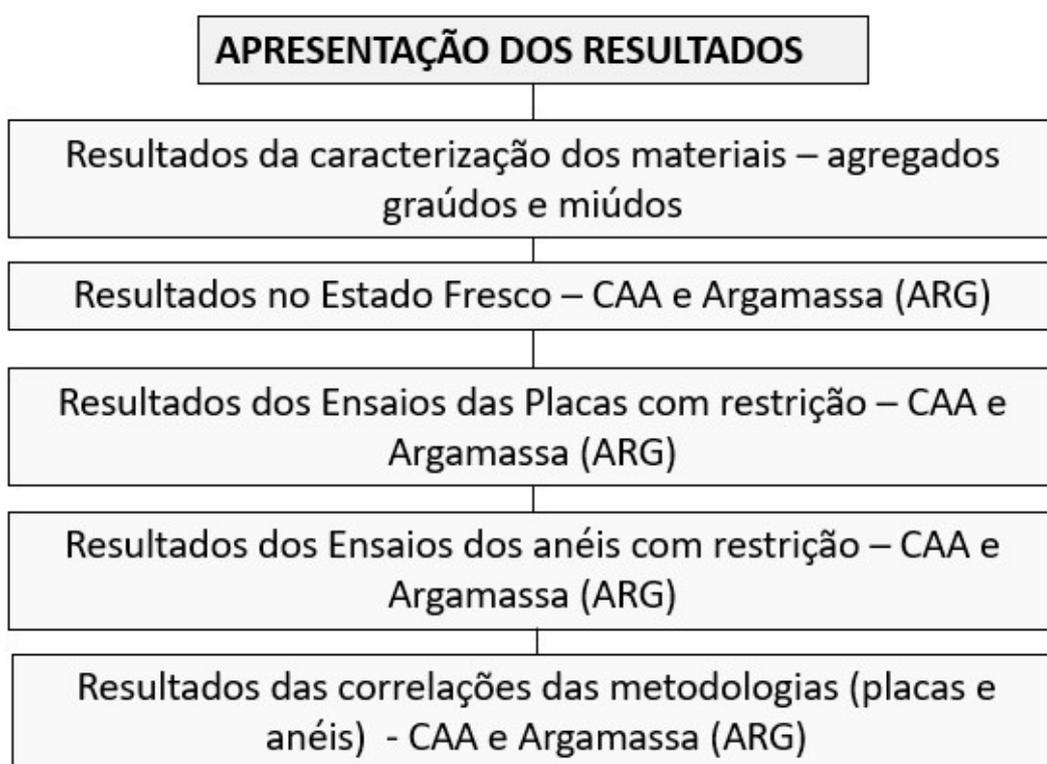
#### **3.5.4. Metodologias de correlação dos resultados**

Para elaboração das correlações dos resultados foram utilizadas as correlações de PEARSON e a análise da variância ANOVA. Em relação ao coeficiente de PEARSON, foram analisados e considerados valores acima de 0,70, ou seja, estabelecidas as correlações forte e muito forte. Na análise da variância ANOVA foram considerados valores de maiores significâncias de influência em relação à área de fissura do CAA valores com valor-*P* abaixo de 0,05 e para estabelecer uma validação da regressão foram considerados valores apresentados no R-quadrado acima de 0,80.

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados dos ensaios de caracterização física dos componentes do CAA e argamassas, dos ensaios no estado fresco e ensaios de fissuração e de retração por meio das placas e anéis. A Figura 44 apresenta o fluxo de apresentação dos resultados.

Figura 44. Fluxo de apresentação dos resultados.



Fonte: Elaborado pelo autor

### 4.1. Resultados da caracterização dos materiais

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física dos agregados graúdos e miúdos componentes do CAA e argamassas.

#### 4.1.1. Caracterização do pó de brita (agregado miúdo)

Empregou-se pó de brita proveniente da região do município de Campinas, estado de São Paulo. O pó de brita utilizado apresentou massa específica igual a  $2,64 \text{ kg/dm}^3$  e massa

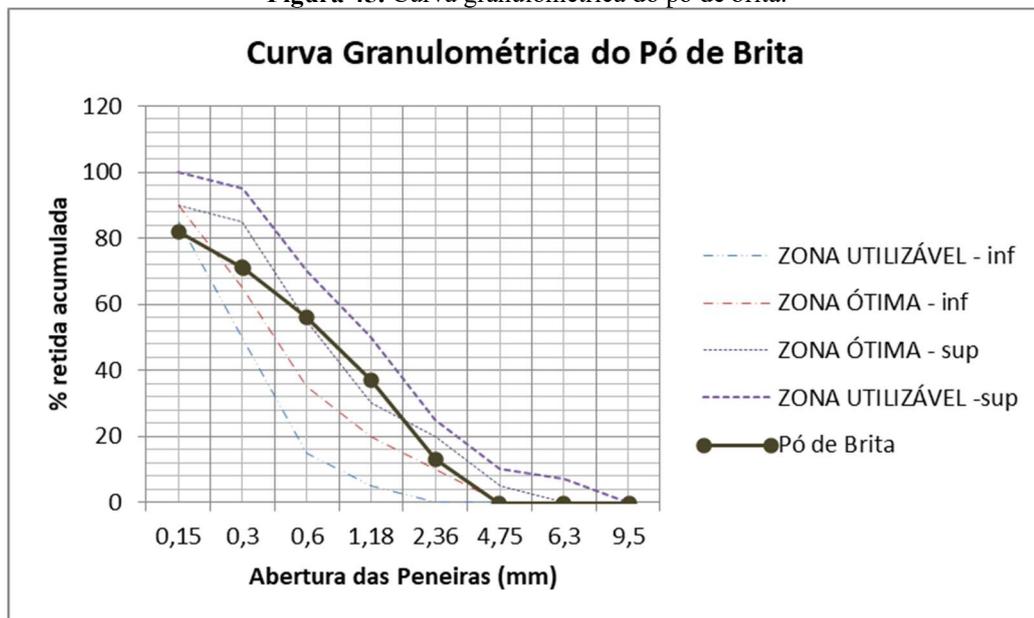
unitária no estado solto e seco igual a  $1,58 \text{ kg/dm}^3$ . A Tabela 13 apresenta a composição granulométrica e na Figura 45 pode-se visualizar a curva granulométrica deste material.

**Tabela 13.** Composição granulométrica do pó de brita.

Abertura da peneira (mm)	Pó de brita	
	% retida	% acumulada
4,8	0	0
2,4	12	13
1,2	25	37
0,6	19	56
0,3	15	71
0,15	11	82
Resíduo	18	100
<b>Dmáx característica</b>	4,8 mm	
<b>Módulo de finura</b>	2,59	
<b>Classificação</b>	Zona ótima	

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 45.** Curva granulométrica do pó de brita.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.2. Caracterização da areia natural (agregado miúdo)

Empregou-se areia natural quartzosa proveniente do município de Limeira, Estado de São Paulo. Na Tabela 14 e Figura 46 é apresentada a sua composição e curva

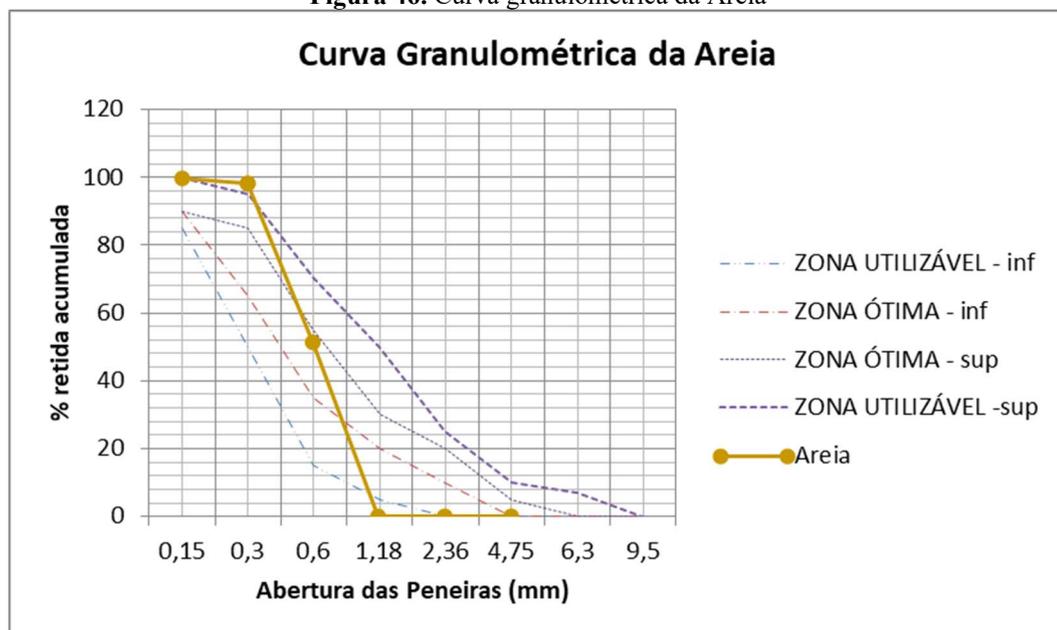
granulométrica. A areia utilizada apresentou massa específica igual a  $2,65 \text{ kg/dm}^3$  e massa unitária no estado solto e seco igual a  $1,52 \text{ kg/dm}^3$ .

**Tabela 14.** Granulometria da areia natural.

Abertura da peneira (mm)	Areia natural	
	% retida	% acumulada
4,8	0,1	0
2,4	1,0	1
1,2	3,0	4
0,6	8,9	13
0,3	41,8	55
0,15	36,3	91
Resíduo	8,7	100
<b>D<sub>máx</sub> característica</b>	1,2 mm	
<b>Módulo de finura</b>	1,64	
<b>Classificação</b>	Zona utilizável inferior	

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 46.** Curva granulométrica da Areia



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.3. Caracterização da brita 0 (agregado graúdo)

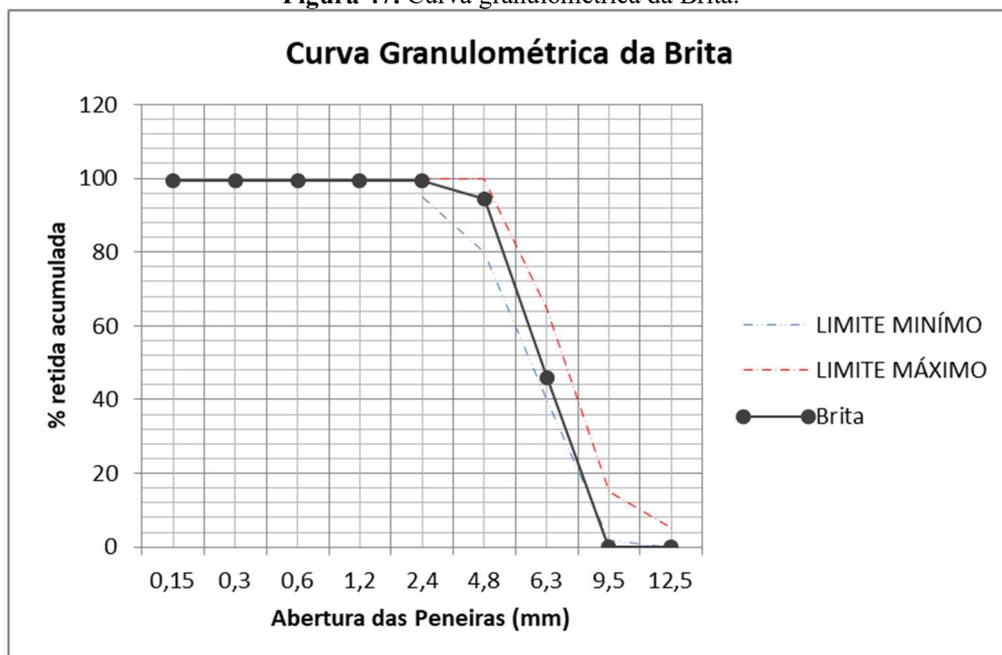
O agregado graúdo utilizado para a produção do concreto é do tipo basáltico. Apresentou massa específica de  $2,90 \text{ kg/dm}^3$  e massa unitária compacta de  $1,51 \text{ kg/dm}^3$ . A composição granulométrica desse material está na Tabela 15 e sua curva granulométrica está na Figura 47.

**Tabela 15.** Composição e classificação granulométrica do agregado graúdo.

Abertura da peneira (mm)	Brita	
	% retida	% acumulada
12,5	0	0
9,5	1	1
6,3	27	28
4,8	34	62
2,4	29	91
1,2	2	93
0,6	1	94
0,3	0	94
0,15	0	94
<b>Resíduo</b>	<b>6</b>	<b>100</b>
<b>Dmáx característica</b>	<b>9,5 mm</b>	
<b>Módulo de finura</b>	<b>5,29</b>	

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 47.** Curva granulométrica da Brita.



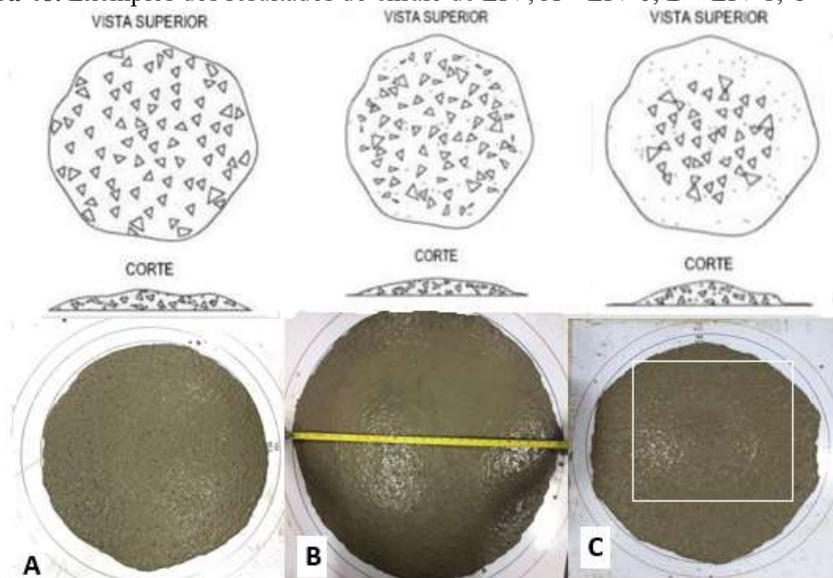
Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2. Resultados do CAA e argamassa no Estado Fresco e endurecido

### 4.2.1. Resultados do CAA no estado fresco e endurecido

O ensaio de índice de estabilidade visual (IEV) avaliou visualmente a capacidade de fluidez e a possibilidade de segregação do CAA. A concentração (ou não) de agregados no centro do círculo formado pelo concreto e a presença (ou não) de borda nesse círculo (exsudação) fornecem indicações interessantes sobre o CAA. A Figura 48 e a Tabela 16 apresentam os resultados do IEV.

**Figura 48.** Exemplos dos resultados do ensaio de EIV; A – EIV 0; B – EIV 1; C – EIV 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 16:** Resultados do ensaio de índice de estabilidade visual (IEV).

ACEITAÇÃO MINÍMA	CAARF <sub>0</sub>	CAARF <sub>6</sub> – 6 mm				CAARF <sub>12</sub> – 12 mm				CAARF <sub>24</sub> – 24 mm			
		0,05 %	0,10 %	0,15 %	0,20 %	0,05 %	0,10 %	0,15 %	0,20 %	0,05 %	0,10 %	0,15 %	0,20 %
IEV0	aceitável	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
IEV1	aceitável	-	-	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-
IEV2	auréola argamassa	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X

Fonte: Elaborado pelo autor

O CAARF<sub>0</sub> apresentou uma classificação de IEV<sub>0</sub>, ou seja, segundo a ABNT NBR 15823-2:2017, é um CAA sem evidência de segregação ou exsudação. O mesmo ocorreu com

CAARF<sub>6</sub> – 6 mm com adição de 0,05%. No caso dos CAARF<sub>6</sub> – 6 mm com as adições de 0,10%, 0,15%, 0,20% , CAARF<sub>12</sub> – 12 mm com as adições 0,05%, 0,10%, 0,15% foram classificados como IEV1, ou seja, não apresentaram segregação e leve exsudação, fato esse que pode ter ocorrido pelo aumento do volume de adição de fibras, mas não apresentou prejuízos em relação ao aspecto visual e ainda possibilitou uma garantir da fluidez. Entretanto, com o limite de 0,20% no CAARF<sub>12</sub> – 12 mm e em todas as adições do CAARF<sub>24</sub> – 24 mm, houve a presença de pequena auréola de argamassa e pontos de empilhamento de agregados e fibras no centro do concreto classificando como IEV2.

Este fato pode ter ocorrido tendo em vista o aumento do volume de fibras, mas principalmente pelo aumento do comprimento. O ensaio do IEV ocorre logo após o ensaio de espalhamento. Foi possível verificar que o aumento do comprimento das fibras criou um aglomerado na argamassa do CAA, prejudicando assim a fluidez, criando um pequeno empilhamento no centro do CAA.

Uma das principais características do CAA são fluidez e a capacidade de preenchimento das formas sem adensamento externo.

O ensaio do espalhamento fornece indicações da fluidez do CAA e de sua habilidade de preenchimento em fluxo livre. No caso do ensaio do funil “V” é verificado a viscosidade do CAA. A baixa viscosidade pode apresentar um rápido espalhamento, porém de curta duração. Já no caso do CAA com alta viscosidade, este pode continuar a se mover de forma lenta e progressiva por um tempo maior.

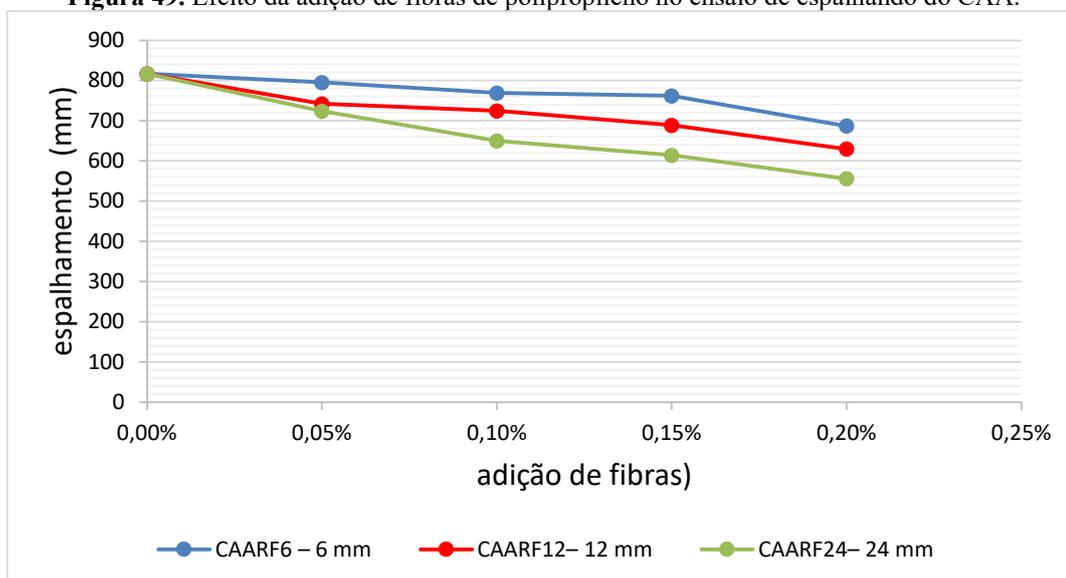
Os resultados médios dos ensaios de espalhamento e do Fuvil “V”, da resistência à compressão e dos módulos de elasticidade do CAARF<sub>0</sub> estão apresentados na Tabela 17 e na Figura 49 são apresentados graficamente os valores do Cone de Abrams.

**Tabela 17:** Resultados do CAA no estado fresco e endurecido do CAARF<sub>0</sub>.

ENSAIOS	Und.	REF	ADIÇÃO DE FIBRAS DE PP (%) - 6 mm				ADIÇÃO DE FIBRAS DE PP (%) - 12 mm				ADIÇÃO DE FIBRAS DE PP (%) - 24 mm			
			0,05%	0,10%	0,15%	0,20%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
Cone de Abrams	mm	817	795	769	762	687	742	725	689	630	723,5	650	614	556
Funil V	seg.	4,1	4,2	4,6	4,8	4,8	4,8	4,9	5,3	5,4	5,5	5,7	6,1	6,4
Resistência à compressão	MPa	59,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Módulo de Elasticidade	GPa	28,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 49.** Efeito da adição de fibras de polipropileno no ensaio de espalhando do CAA.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em relação aos resultados do espalhamento pelo Cone de Abrams o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou um espalhamento médio de 817 mm, de acordo com os critérios apresentados na ABNT NBR 15823-1:2017, sendo classificado como SF3 (espalhamento entre 760 a 850 mm). O traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm com as adições 0,05%, 0,10% e 0,15% apresentaram uma redução no espalhamento quando comparado com o CAARF<sub>0</sub> sendo classificados como SF3.

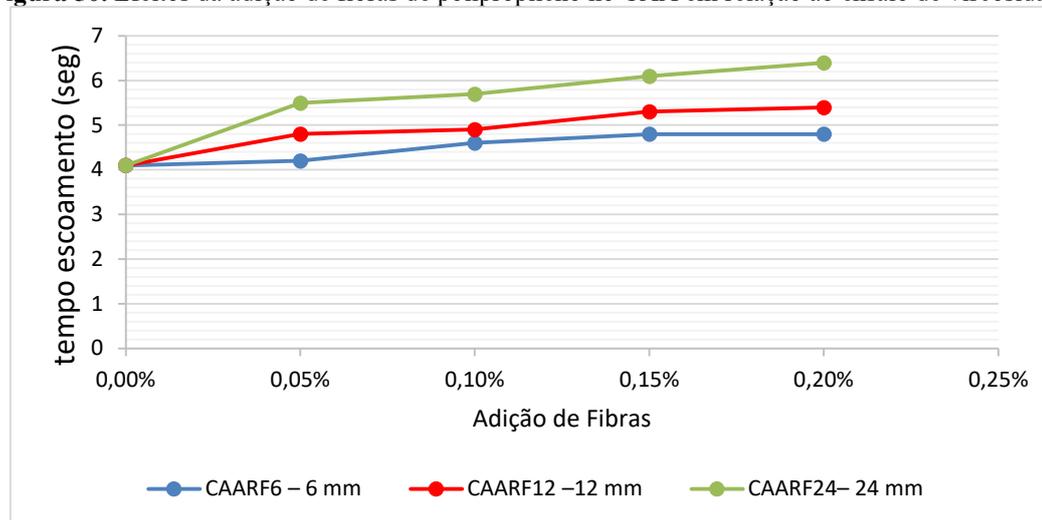
A mudança da classificação para SF2 (espalhamento entre 660 a 750 mm) foi verificada no traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm com as adições 0,05%, 0,10%, 0,15% e no CAARF<sub>24</sub> – 24 mm com adição de 0,05%.

As maiores reduções na abertura do espalhamento e a mudança de classificação para SF1 (espalhamento entre 550 a 650mm) ocorrem nos traços CAARF<sub>12</sub> – 12 mm com adição 0,20% e CAARF<sub>24</sub> – 24 mm com as adições 0,10%, 0,15% e 0,20%. Em relação ao CAARF<sub>0</sub> houve uma redução na abertura do espalhamento entre 200 a 260 mm (redução de aproximadamente 72%) quando comparado com CAARF<sub>24</sub> – 24 mm com as adições 0,15% e 0,20%. O comprimento das fibras e as adições acima de 0,15% influenciaram diretamente na fluidez do CAA. Fato esse que foi observado também na moldagem das placas e dos anéis para os ensaios de retração.

Foi possível verificar a redução da fluidez devido aos aglomerados das fibras ao longo da moldagem, ou seja, a variável comprimento influência nos aspectos de fluidez devido à dificuldade de proporcionar uma melhor distribuição no CAA. Foi possível observar

um empacotamento das fibras de maior comprimento logo após a mistura influenciando assim o índice de espalhamento. A Figura 50 mostra os resultados em forma de gráfico.

**Figura 50.** Efeitos da adição de fibras de polipropileno no CAA em relação ao ensaio de viscosidade.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

As fibras também apresentaram influência na avaliação da viscosidade por meio do ensaio do Funil “V”. Entretanto, todos os ensaios foram classificados segundo a ABNT NBR 15823-1:2017, VF1, ou seja, apresentou um tempo de escoamento  $\leq 8$  segundos.

Vale ressaltar que os CAARF<sub>24</sub> - 24 mm com as adições 0,15% e 0,20% apresentaram um aumento no tempo de escoamento entre 2 a 2,3 segundos em relação as demais misturas. Fato esse que se correlaciona com a redução do espalhamento no ensaio do Cone de Abrams. A Tabela 18 apresenta a análise da correlação entre o ensaio do Cone de Abrams e o ensaio do Funil “V”.

**Tabela 18:** Resultados do cálculo do coeficiente de Pearson (r) – Cone de Abrams x Funil “V”.

Cone de Abrams x Funil "V"	Coefficiente de correlação PEARSON (r)
CAARF <sub>6</sub> - 6 mm	-0,72
CAARF <sub>12</sub> - 12 mm	-0,93
CAARF <sub>24</sub> - 24 mm	-0,97

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Por meio do cálculo do coeficiente de correlação PEARSON (r), que tem como objetivo avaliar o grau de correlação através de valores situados entre -1 e 1, isto é, quando o

coeficiente de correlação se aproxima de 1 existe uma relação diretamente proporcional, e -1 inversamente proporcional.

Como os valores apresentados encontram-se mais próximos de -1, é possível concluir que a redução do espalhamento (mm) provoca um aumento no tempo de escoamento. O CAARF<sub>24</sub> – 24 mm, apresentou a maior correlação, seguido pelo traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm, fato este que está relacionado com o comprimento das fibras.

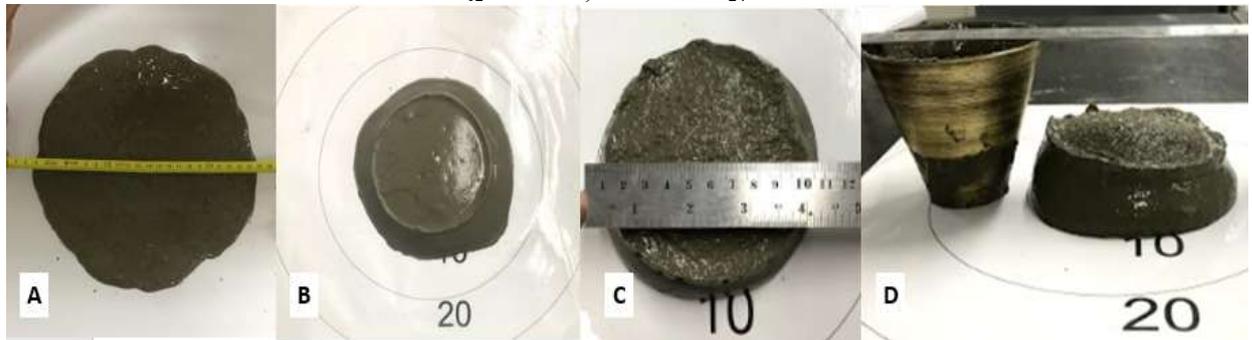
Segundo estudos de Onghero (2017) a incorporação de fibra em misturas muito viscosas, impõem restrições significativas no ensaio de consistência reduzindo os valores de espalhamento. Para concretos com 0,20% e 0,30% de fibras poliméricas, em relação ao seu volume, observou-se redução média de espalhamento de 230 mm comparando-se ao traço de referência (650 mm).

Silva (2018) observa que o teor e o comprimento das microfibras de PP influenciam diretamente na trabalhabilidade do CAA. Traços de CAA com adições variando entre 0,05% e 0,20% de microfibras apresentam redução no ensaio de espalhamento em média de 235 mm quando comparado com o traço de referência que foi de 815 mm. Verifica também que a trabalhabilidade do CAA começa a ser afetada a partir da adição de 0,10% de fibras. Além disso as microfibras com comprimento acima de 12 mm apresentam maior influência na fluidez do sistema.

#### **4.2.2. Resultados da Argamassa (ARG) no estado fresco**

Foram realizados os ensaios da argamassa do CAA no estado fresco para verificar o grau de influência da adição de fibras na fluidez. Apesar da falta de parâmetros normativos para caracterizar a grau de fluidez das argamassas, por meio do ensaio de mini-abatimento e metodologia apresentada pela norma ASTM C1437:2007 foi possível estabelecer relações entre a adição das fibras e a fluidez. A Figura 51 apresenta a influência das fibras na fluidez das argamassas, sendo possível verificar uma redução significativa na fluidez ao longo do aumento do comprimento das fibras.

**Figura 51.** Efeito da adição de fibras no ensaio do mini-abatimento. A - ARGRF<sub>0</sub>; B - ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm; C - ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm; D - ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm.



Fonte: Elaborado pelo autor

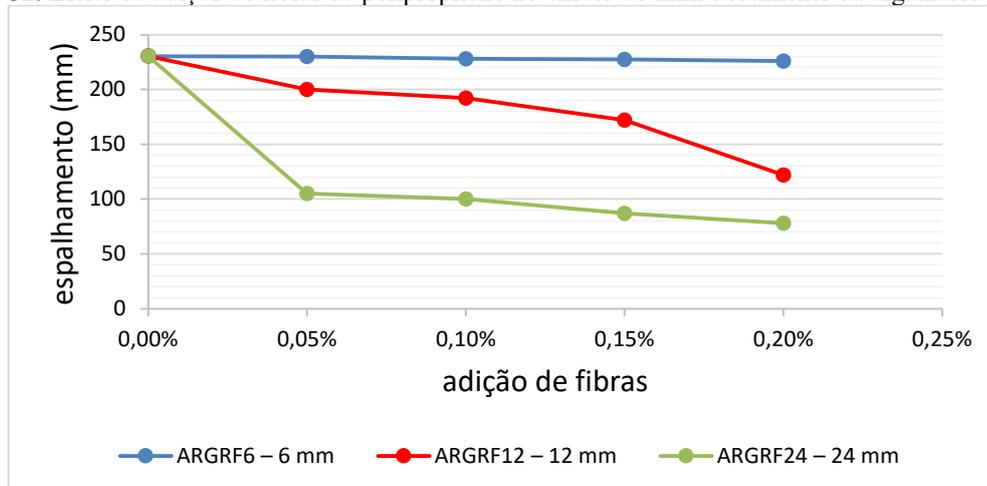
Os resultados do ensaio e o coeficiente de PEARSON estão apresentados na Tabela 19 e na Figura 52.

**Tabela 19:** Análise da adição das fibras de polipropileno no ensaio mini-abatimento e coeficiente de correlação PEARSON.

	Adição de fibras (%)	Mini-abatimento mm	Coefficiente de correlação PEARSON (r)
ARGRF <sub>0</sub>	0%	230,5	
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0,05%	230	-0,98
	0,10%	228	
	0,15%	227,5	
	0,20%	226	
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0,05%	200	-0,96
	0,10%	192	
	0,15%	172	
	0,20%	122	
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0,05%	105	-0,82
	0,10%	100	
	0,15%	87	
	0,20%	78	

Fonte: elaborado pelo autor

**Figura 52.** Efeito da adição de fibras de polipropileno no ensaio do mini-abatimento da argamassa do CAA.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Todos os traços de argamassas com adição das fibras sofreram influência na fluidez e apresentaram uma redução no espalhamento. O traço ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm para todos os teores de fibras, apresentou a menor redução quando comparado com ARGRF<sub>0</sub>, de aproximadamente 0,86%.

O traço ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm, com adições de 0,15% e 0,20%, apresentaram uma redução de aproximadamente 64% na fluidez quando comparado com o traço ARGRF<sub>0</sub>. A trabalhabilidade foi outro ponto observado durante a realização da mistura na argamassadeira, as fibras formam um aglomerado dificultando a moldagem nas formas.

O coeficiente de correlação PEARSON ( $r$ ) valida a correlação do aumento da adição de fibras com a redução da fluidez. Os traços ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm e ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm apresentaram a maior correlação. O empacotamento das fibras que ocorrem no ato da moldagem pode ser um dos fatores de influência.

### 4.3. Resultados dos ensaios das Placas com restrição

Neste tópico são apresentados os resultados dos ensaios das placas com restrição no CAA e na argamassa, utilizando as placas 560 x 350 mm e 300 x 300mm.

#### 4.3.1. Resultado dos ensaios da placa com restrição no CAA

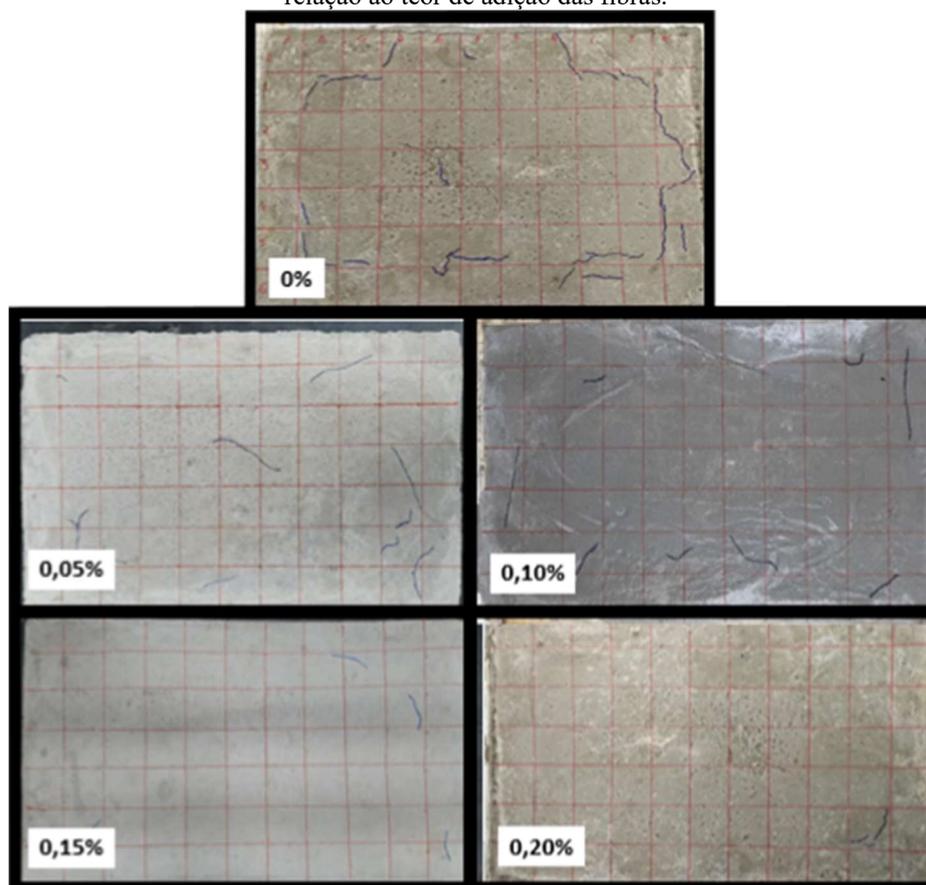
De acordo com a metodologia apresentada, os traços de referência de CAA

(CAARF) e argamassa (ARGRF) foram analisados quanto à formação de fissuras. Com os resultados apresentados foram obtidos dados de comprimento e largura das fissuras, sendo possível calcular a área média da fissuração (em  $\text{mm}^2$ ). Com a adição de fibras observou-se a taxa de redução desta área. Com a proposta de redução da área da placa, foi possível analisar e estabelecer uma correlação entre as variáveis.

#### 4.3.1.1. Resultados dos ensaios da placa 560 x 350 mm - CAA

A Figura 53 apresenta a evolução da redução das áreas de fissuração do CAA na placa 560 x 350 mm em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno.

**Figura 53.** Análise visual do processo de redução da área de fissuração da placa de 560 x 350 mm de CAA em relação ao teor de adição das fibras.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados das larguras médias de fissuração e a taxa de redução estão apresentados na Tabela 20 e na Figura 54.

**Tabela 20:** Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação as placas 560 x 350 mm.

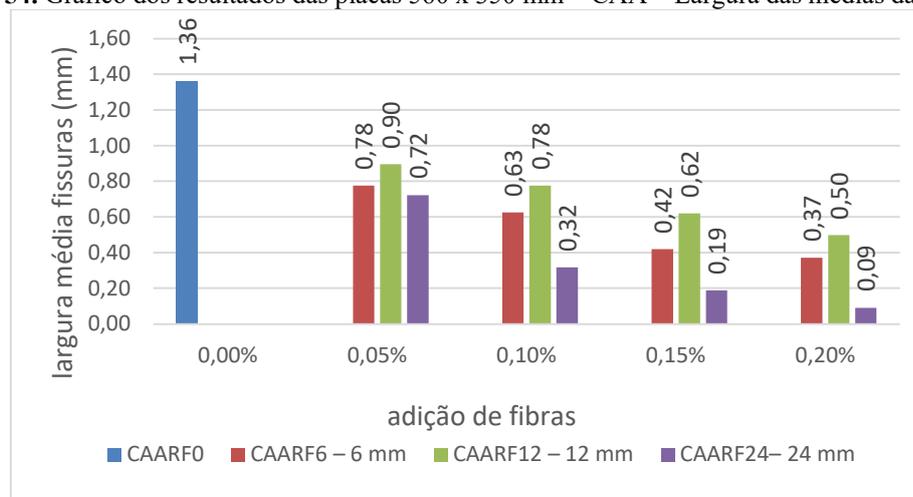
Fibras	Largura média das fissuras (mm) PLACA 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	1,36	0	0	0	0
CAARF6 – 6 mm	0	0,78	0,63	0,42	0,37
CAARF12 – 12 mm	0	0,90	0,78	0,62	0,50
CAARF24– 24 mm	0	0,72	0,32	0,19	0,09

Fibras	Taxa de Redução da largura média das fissuras (mm) PLACA 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
CAARF6 – 6 mm	0	43,12%	54,13%	69,17%	72,84%
CAARF12 – 12 mm	0	34,31%	43,12%	54,50%	63,49%
CAARF24– 24 mm	0	46,97%	76,70%	86,24%	93,39%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 54.** Gráfico dos resultados das placas 560 x 350 mm – CAA – Largura das médias das fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo considerações apresentadas por Silva (2018) para o cálculo da área de fissuração, outros fatores além da largura das fissuras devem ser observados, como a distribuição das fissuras na superfície. Analisar separadamente a largura das fissuras possibilita a verificação do efetivo controle e absorção das tensões pelas fibras adicionadas. Ou seja, quanto menor a largura da fissura, maior é a sua ligação e transferência de tensões.

Outro ponto que deve ser abordado em relação ao estudo da largura das fissuras está relacionado com a ABNT NBR 6118:2014. No item 13.4 desta norma, discrimina-se os limites para controlar a abertura de fissuras para o concreto armado de acordo com a classe de agressividade, cujas exigências relativas à fissuração podem variar de 0,2mm a 0,4mm de

abertura.

De acordo com os resultados expostos, o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou uma largura média de 1,36 mm. Os traços com adição de fibras apresentaram redução da largura das fissuras quando comparado com o CAARF<sub>0</sub>. Os traços CAARF<sub>6</sub> – 6 mm apresentaram uma redução da largura das fissuras entre 43% e 73% sendo que a maior redução está relacionada a adição de 0,20%.

O traço que apresentou maior taxa de redução foi CAARF<sub>24</sub> – 24 mm com adição de 0,20% com uma largura de 0,09 mm e uma taxa de redução de 93,39%.

É possível observar também que o traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm apresentou a menor taxa de redução quando comparado com os traços CAARF<sub>6</sub> – 6 mm e CAARF<sub>24</sub> – 24 mm. Este fato pode estar relacionado a uma menor eficiência em relação a diminuição da largura das fissuras, mas pode ocorrer uma maior eficiência no controle em relação a sua distribuição.

Esta menor eficiência na diminuição das larguras das fissuras pode ser claramente discutida quando comparado o traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm com adição de 0,15% que apresenta uma taxa de redução de 69,17%, ou seja, 14,67% maior quando comparado com os traços CAARF<sub>12</sub> – 12 mm de adição de 0,15%, na adição de 0,20% essa diferença é de aproximadamente 5,58%

Por meio da largura das fissuras e da medição de seu comprimento, é possível calcular a área média de fissuração. A Tabela 21 apresenta os respectivos resultados da média das áreas de fissuração e na Figura 55 pode-se visualizar o gráfico dos resultados.

**Tabela 21:** Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 560 x 350 mm.

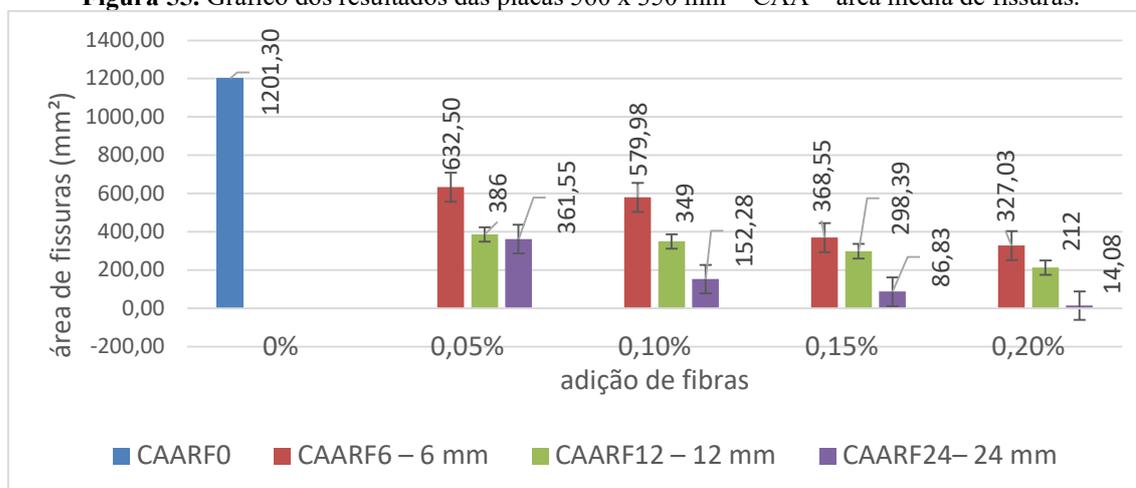
Fibras	Área de Fissuração (mm <sup>2</sup> ) PLACA 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	1201,30				
CAARF <sub>6</sub> – 6 mm		632,50	579,98	368,55	327,03
CAARF <sub>12</sub> – 12 mm		386	349	298,39	212
CAARF <sub>24</sub> – 24 mm		361,55	152,28	86,83	14,08

Fibras	Taxa de Redução da Área de Fissuração (mm <sup>2</sup> ) PLACA 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
CAARF <sub>6</sub> – 6 mm	0	47,35%	51,72%	69,32%	72,78%
CAARF <sub>12</sub> – 12 mm	0	67,87%	70,95%	75,16%	82,35%
CAARF <sub>24</sub> – 24 mm	0	69,90%	87,32%	92,77%	98,83%

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 55.** Gráfico dos resultados das placas 560 x 350 mm – CAA – área média de fissuras.



**Fonte:** Elaborado pelo autor

Por meio das análises e comparações dos resultados apresentados, é possível verificar que as fibras influenciam na redução da formação e no surgimento de fissuras. O traço CAARF<sub>0</sub>, apresentou uma área de fissuração média de 1201,30 mm<sup>2</sup>. Com a adição de fibras ao longo dos ensaios foi possível observar uma redução na área de fissuração e na largura média das fissuras.

Outro fator que influenciou diretamente nessas reduções foi o comprimento das fibras. O traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm apresentou uma taxa de redução na área média de fissuras que variou de 47% a 72%, sendo essa última na adição de 0,20%.

No caso dos traços CAARF<sub>12</sub> – 12 mm e CAARF<sub>24</sub> – 24 mm houve uma variação entre 67% a 98%. O traço com CAARF<sub>24</sub> – 24 mm e adição de 0,20% apresentou o melhor resultado reduzindo aproximadamente 98,83% quando comparado com CAARF<sub>0</sub>.

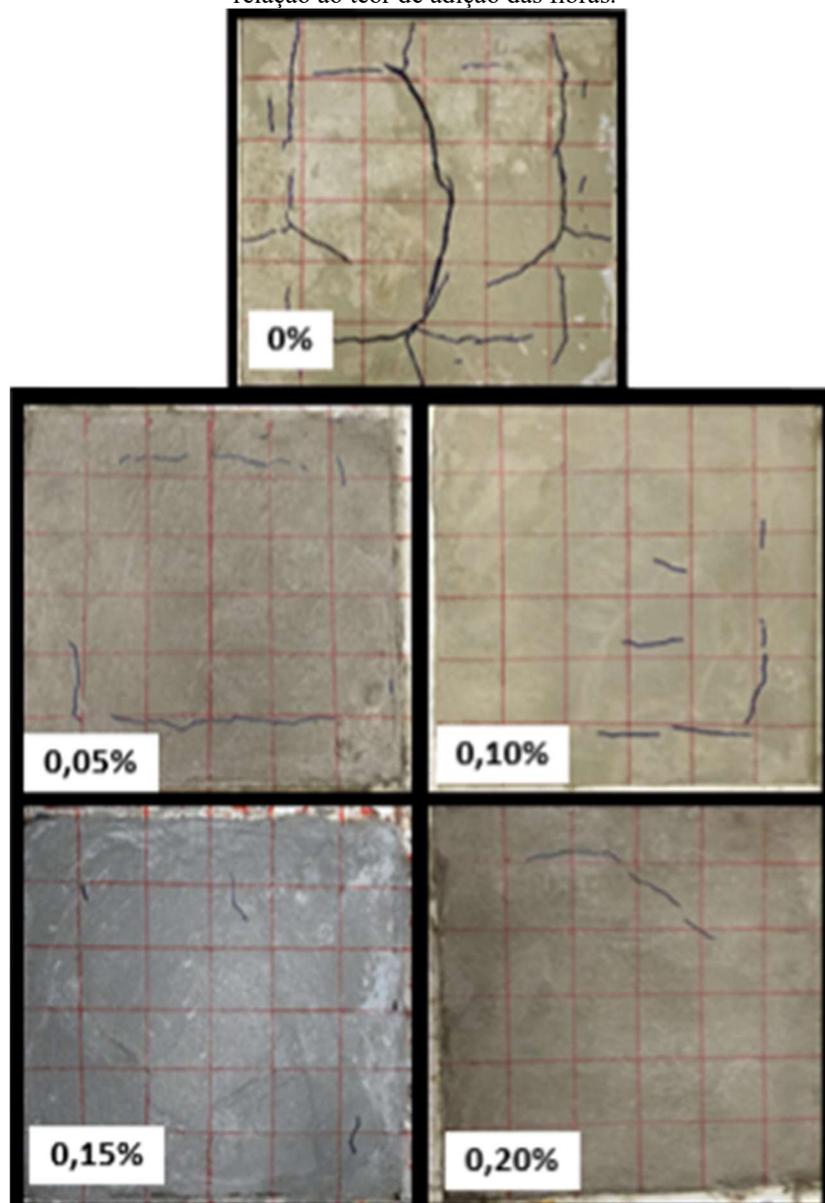
Conforme Figueiredo (2011), Cristofoli et al. (2018), Silva (2018) e Alferes Filho, Monte e Figueiredo (2019) o teor e comprimento das fibras atuam como ponte de transferências de tensão, ou seja, quanto maior o teor de fibras, menor o surgimento ou desenvolvimento de fissuras, seja para fibras sintéticas ou fibras metálicas.

Segundo Jadhav, Pawar e Dokhale (2017) a redução das áreas de fissuras de CAA estão vinculadas a redução das larguras das fissuras devido ao efeito da “costura” das partículas da superfície do concreto que podem chegar até 55% da redução.

#### 4.3.1.2. Resultados dos ensaios da placa 300 x 300 mm - CAA

O exemplo da metodologia para o mapeamento das fissuras para obter os valores de comprimento e largura das fissuras podem ser observados na Figura 56. Os resultados das larguras médias de fissuração e a taxa de redução em relação ao traço CAARF<sub>0</sub> estão apresentados na Tabela 22 e na Figura 57 o resultado visual da evolução da redução da área de fissuração.

**Figura 56.** Análise visual do processo de redução da área de fissuração da placa de 300 x 300 mm de CAA em relação ao teor de adição das fibras.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 22:** Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 300 x 300 mm.

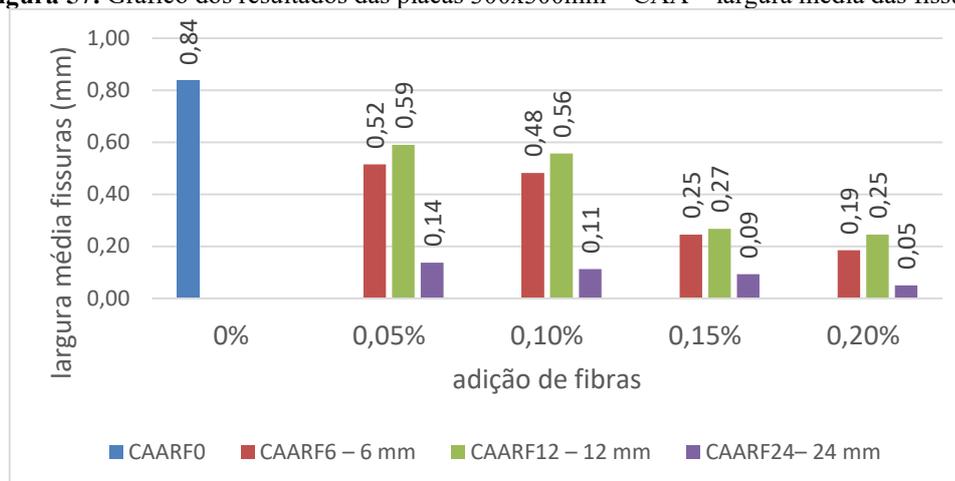
Fibras	Largura média das fissuras (mm) PLACA 300 X 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	0,84	0	0	0	0
CAARF6 – 6 mm	0	0,52	0,48	0,25	0,19
CAARF12 – 12 mm	0	0,59	0,56	0,27	0,25
CAARF24– 24 mm	0	0,14	0,11	0,09	0,05

Fibras	Taxa de Redução da largura média das fissuras (mm) PLACA 300 X 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
CAARF6 – 6 mm	0	38,32%	42,22%	70,66%	77,84%
CAARF12 – 12 mm	0	29,34%	33,23%	67,96%	70,66%
CAARF24– 24 mm	0	83,53%	86,53%	88,92%	94,01%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 57.** Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – CAA – largura média das fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados, o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou uma largura média de 0,84 mm. Os traços com adição de fibras apresentaram redução da largura das fissuras quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub>. Os traços CAARF6 – 6 mm apresentaram uma redução da largura da fissura entre 38,32% e 77,84%, sendo que a maior redução está relacionada a adição de 0,20%.

O traço que apresentou maior taxa de redução foi CAARF<sub>24</sub> – 24 mm com adição de 0,20% com uma largura de 0,05 mm e uma taxa de redução de 94,01%. Os traços com as fibras CAARF<sub>12</sub> – 12 mm apresentaram novamente uma baixa eficiência na redução das larguras das fissuras, entretanto, nesse ensaio a diferença entre os traços com as fibras de

menores comprimentos (6 mm) foi menor, média de 2,7% em relação a taxa de redução.

Outro fato que pode ser observado também foram as maiores diferenças de redução da largura das fissuras em relação a adição de fibras. As adições com 0,15% apresentaram as maiores variações.

Em relação a área de fissuração os resultados estão apresentados na Tabela 23 e na Figura 58.

**Tabela 23:** Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução do CAA em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno – placas 300 x 300 mm.

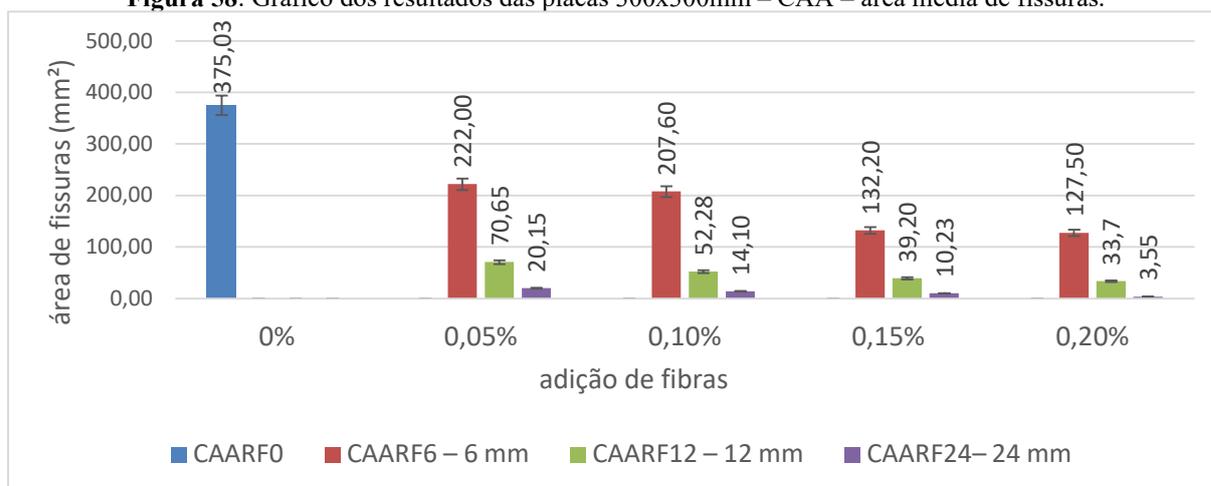
Fibras	Área de Fissuração (mm <sup>2</sup> ) PLACA 300 X 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	375,03	0	0	0	0
CAARF6 – 6 mm	0	222,00	207,60	132,20	127,50
CAARF12 – 12 mm	0	70,65	52,28	39,20	33,7
CAARF24– 24 mm	0	20,15	14,10	10,23	3,55

Fibras	Taxa de Redução da Área de Fissuração (mm <sup>2</sup> ) PLACA 300 X 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
CAARF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
CAARF6 – 6 mm	0	40,80%	44,64%	64,75%	66,00%
CAARF12 – 12 mm	0	81,16%	86,06%	89,55%	91,01%
CAARF24– 24 mm	0	94,63%	96,24%	97,27%	99,05%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 58.** Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – CAA – área média de fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação aos ensaios com as placas nas dimensões de 300 x 300 mm o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou uma área média de fissuração de 375,03 mm<sup>2</sup>. Todos os traços reforçados

com fibras apresentaram redução nas áreas de fissuração. Os traços CAARF<sub>12</sub> – 12 mm e CAARF<sub>24</sub> – 24 mm apresentaram os melhores resultados, reduzindo acima de 80% da área de fissuração.

O melhor resultado apresentado foi no traço CAARF<sub>24</sub> – 24 mm com a adição de 0,20% que apresentou uma redução de 99,04%. Em relação aos traços de CAARF<sub>24</sub> – 24 mm vale ressaltar que, para a identificação das fissuras, foi utilizado lentes de aumento devido à dificuldade de análise visual.

Outro ponto que pode ser observado é a maior diferença ocorrida na redução das áreas de fissuração, que pode ser verificado no traço de CAARF<sub>6</sub> – 6 mm entre as adições de 0,10% e 0,15% que apresentou uma diferença de 75,4 mm<sup>2</sup>.

Como apresentado anteriormente, os traços CAARF<sub>12</sub> – 12 mm não apresentaram uma boa eficiência em relação a redução da largura das fissuras, entretanto, em relação a redução das áreas de fissuração ele apresentou um ótimo desempenho, reduzindo em média, 86% quando comparado com o CAARF<sub>0</sub>.

Apesar dos traços CAARF<sub>6</sub> – 6 mm apresentar uma média 32% mais baixa que os traços de CAARF<sub>12</sub> – 12 mm, esses valores não podem ser desprezados quando o ponto da análise é a redução de área de fissuras. Os traços CAARF<sub>6</sub> – 6 mm com adição de 0,15% apresentou uma taxa de redução acima de 60%.

#### **4.3.1.3. Análise comparativa e resultados correlacionados das placas de CAA**

Este tópico tem como objetivo apresentar uma análise comparativa entre os resultados das placas na dimensão 560 x 350 mm e placa 300 x 300, e verificar o nível de correlação com a redução da área e os resultados encontrados.

Os resultados comparativos dos traços CAARF<sub>0</sub> estão apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24:** Resultados comparativos entre as placas 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – CAARF<sub>0</sub>.

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	redução da área placa		Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras		redução da área média das fissuras	
		mm <sup>2</sup>	%	mm	mm	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%		
560x350	196.000,00	106.000,00	54,08	1,36	0,53	38,72	1.201,30	826,28	375,03	826,28	68,78
300x300	90.000,00			0,84			375,03				

Fonte: Elaborado pelo autor

A redução da placa apresentou uma redução de aproximadamente de 54,08% na área de fissuração. A comparação entre as larguras médias das placas apresentou uma diferença de aproximadamente 38,72% e em relação a área de fissuração, essa diferença foi maior, aproximadamente 68,78%. Apesar de apresentar uma correlação direta, ou seja, a diminuição da área de fissuras proporcionou uma redução na largura das fissuras e na área de fissuração, entretanto, as diferenças apresentadas não validam uma redução proporcional em relação ao tamanho da placa.

A Tabela 25 apresenta os resultados comparativos entre as placas de 560 x 350 mm e 300x300 mm e os resultados da matriz de correlação do traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm.

**Tabela 25:** Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – CAARF<sub>6</sub> – 6 mm.

Placas (mm)	Fibras (mm)	adição das fibras (%)	Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras		redução da área média das fissuras		Coeficiente de correlação PEARSON
			mm	mm	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%			
560x350	6	0,05	0,78	0,26	33,55%	632,50	410,50	64,90%	0,86		
300x300		0,05	0,52			222,00					
560x350		0,10	0,63	0,14	22,80%	579,98	372,38	64,21%			
300x300		0,10	0,48			207,60					
560x350		0,15	0,42	0,18	41,67%	368,55	236,35	64,13%			
300x300		0,15	0,25			132,20					
560x350		0,20	0,37	0,19	50,00%	327,03	199,53	61,01%			
300x300		0,20	0,19			127,50					

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação aos resultados encontrados dois pontos devem ser observados em relação a largura das fissuras e áreas fissuradas. Apesar do coeficiente de correlação de

PEARSON ser 0,86, ou seja, as variáveis possuem uma relação positivamente direta e podem ser classificadas como uma correlação forte. É possível analisar que em relação a largura das fissuras não houve um padrão de redução, se comparar os resultados das adições de 0,05% com as adições de 0,10%, foi possível verificar que as adições de 0,05% apresentaram uma maior eficiência.

Entretanto, em relação a área de redução, foi possível observar uma redução similar entre as placas. Ou seja, apesar da área de fissura ser menor nas placas de 300x300 mm é possível estabelecer uma redução proporcional em relação as placas de 560x350 mm. Fato esse que pode estar relacionado a forma de distribuição das fibras ao longo da moldagem. As correlações estão apresentadas na Tabela 26.

**Tabela 26:** Resultados da matriz de correlação – CAARF<sub>6</sub> – 6mm.

	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Largura média fissuras	Área média fissuras
Área da placa (mm <sup>2</sup> )	1		
Largura média fissuras	0,53	1	
Área média fissuras	0,84	0,86	1

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Os resultados apresentados na matriz de relação estabeleceram três variáveis, sendo, área da placa, largura das fissuras e área de fissuração. Foi possível observar que existe uma correlação direta e positiva entre as variáveis. As variáveis que apresentam uma maior correlação foram área da placa e a largura das fissuras que segundo Figueiredo Filho et al. (2014) podem ser classificadas como forte. E a relação entre largura média das fissuras e área da placa uma correlação moderada.

A Tabela 27 apresenta os resultados comparativos entre as placas de 350x560 mm e 300x300 mm do traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm.

**Tabela 27:** Resultados comparativos entre as 560x350 mm e 300 x 300 mm – CAARF<sub>12</sub> – 12 mm.

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Fibras (mm)	adição das fibras (%)	Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras		redução da área média das fissuras	Coeficiente de correlação PEARSON
				mm	mm	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%		
560x350	196.000,00	12	0,05	0,90	0,31	34,08%	386,00	315,35	81,70%	0,83	
300x300	90.000,00		0,05	0,59							
560x350	196.000,00		0,10	0,78	0,22	28,06%	349,00	296,73	85,02%		
300x300	90.000,00		0,10	0,56							
560x350	196.000,00		0,15	0,62	0,35	56,85%	298,39	259,19	86,86%		
300x300	90.000,00		0,15	0,27							
560x350	196.000,00		0,20	0,50	0,25	50,75%	212,00	178,30	84,10%		
300x300	90.000,00		0,20	0,25							

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em relação aos resultados apresentados para o traço CAARF<sub>12</sub> – 12mm as análises se assemelham com os resultados apresentados para o traço CAARF<sub>6</sub> – 6mm. Isto é, as larguras das fissuras não possuem um padrão de relação com as adições e com a área de fissuração. Essa diferença de padrão pode ser verificada quando comparada as adições de 0,15% e 0,20% e 0,05% e 0,10%. O Coeficiente de correlação PEARSON apresentou um valor de 0,83, validando uma forte correlação direta entre as variáveis.

Ainda assim, os resultados apresentados em relação a redução das áreas fissuradas, obtiveram uma correlação proporcional entre as placas. Independente da redução da placa a porcentagem de redução foram similares. A Tabela 28 mostra a matriz de correlação do traço CAARF<sub>12</sub> – 12mm.

**Tabela 28:** Resultados da matriz de correlação – CAARF<sub>12</sub> – 12mm.

	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Largura média fissuras	Área média fissuras
Área da placa (mm <sup>2</sup> )	1		
Largura média fissuras	0,60	1	
Área média fissuras	0,95	0,75	1

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Segundo os resultados apresentados a maior correlação no traço CAARF<sub>12</sub> – 12mm pode ser identificada entre área média de fissuras e área da placa, uma correlação muito forte. A largura média das fissuras apresentou uma correlação positiva moderada com a área da placa. Uma correlação forte pode ser observada entre área média das fissuras e a

largura média das fissuras.

As Tabelas 29 e 30 apresentam os resultados comparativos entre as placas de 560x350 mm e 300x300 mm e os resultados da matriz de correlação do traço CAARF<sub>24</sub> – 24 mm.

**Tabela 29:** Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – CAARF<sub>24</sub> – 24 mm.

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Fibras (mm)	adição das fibras (%)	Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras		redução da área média das fissuras		Coeficiente de correlação PEARSON
				mm	mm	mm	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%		
560x350	196.000,00	24	0,05	0,72	0,59	80,97%	361,55	341,40	94,43%	0,99		
300x300	90.000,00		0,05	0,14			20,15					
560x350	196.000,00		0,10	0,32	0,21	64,57%	152,28	138,18	90,74%			
300x300	90.000,00		0,10	0,11			14,10					
560x350	196.000,00		0,15	0,19	0,10	50,67%	86,83	76,60	88,22%			
300x300	90.000,00		0,15	0,09			10,23					
560x350	196.000,00		0,20	0,09	0,04	44,44%	14,08	10,53	74,78%			
300x300	90.000,00		0,20	0,05			3,55					

Fonte: Elaborado pelo autor

**Tabela 30:** Resultados da matriz de correlação – CAARF<sub>24</sub> – 24mm.

	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Largura média fissuras	Área média fissuras
Área da placa (mm <sup>2</sup> )	1		
Largura média fissuras	0,60	1	
Área média fissuras	0,69	0,97	1

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de apresentar uma correlação muito forte, como apresentado no coeficiente de correlação de PEARSON, o traço CAARF<sub>24</sub> – 24mm apresentaram maior divergências nos resultados. Os traços com os menores teores de adição, ou seja, 0,05% e 0,10% apresentaram uma porcentagem maior de área fissurada entre as placas. Os resultados mostram que não foi possível estabelecer uma relação entre as larguras e as áreas de fissuração. Silva (2018) observa que a área de fissuração não está apenas vinculada a largura das fissuras. Neves, Branco e Brito (2010) ressaltam que a profundidade das fissuras pode influenciar no potencial de propagação das fissuras, aumentando assim sua área de abrangência.

Ainda em relação o traço CAARF<sub>24</sub> – 24mm vale que ressaltar que houve uma

redução na sua taxa de espalhamento e escoamento. Fato esse que pode influenciar na distribuição das fibras nas placas apresentando assim uma instabilidade nos resultados.

De acordo com a matriz de correlações, podem ser consideradas correlações moderadas as estabelecidas com a área da placa e largura média das fissuras, área da placa e área média das fissuras.

Com o objetivo de verificar a interação de todas as variáveis envolvidas que possam influenciar na área de fissuração do CAA realizou-se uma análise de regressão múltipla e uma análise da variância (ANOVA). As variáveis utilizadas para a simulação foram: área da placa, largura das fissuras, comprimento das fibras e teor de adição.

A Tabela 31 apresenta os resultados das estatísticas de correção e a análise da variância (ANOVA) das placas 560x350 mm, 300x300 mm, CAARF<sub>0</sub> dos CAARF<sub>6-12-24</sub> e suas respectivas adições.

**Tabela 31:** Resultados da análise de regressão – ANOVA – Placas do CAA.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0,922496							
R-Quadrado	0,850998							
R-quadrado ajustado	0,821198							
Erro padrão	76,84989							
Observações	25							

ANOVA					F de significação			
	gl	SQ	MQ	F				
Regressão	4	674611,9	168653	28,55667	5,13E-08			
<b>Resíduo</b>	<b>20</b>	<b>118118,1</b>	<b>5905,905</b>					
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>792730</b>						

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Interseção	177,9008	102,5724	1,734392	0,098236	-36,0615	391,863	-36,0615	391,863
área de forma	0,002207	0,000421	5,247692	3,9E-05	0,00133	0,003085	0,00133	0,003085
largura fissura	14,57881	137,3285	0,10616	0,916513	-271,883	301,041	-271,883	301,041
comprimento fibra (mm)	-12,3062	2,912763	-4,22493	0,000416	-18,3821	-6,2303	18,3821	-6,2303
adição (%)	-1055,02	436,533	-2,41682	0,025334	-1965,62	-144,431	1965,62	-144,431

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em relação a análise da variância alguns pontos devem ser observados para a validação da regressão e do modelo proposto. Primeiro ponto que deve ser analisado é o F de significação que deve se apresentar valores abaixo de 0,05 para validar a regressão. Neste

caso, a análise apresentou um valor de 0,0000513, sendo válida a regressão.

Outro fator que deve ser analisado é o R-quadrado ajustado, este fator explica em porcentagem quanto as variáveis independentes explicam a variação dependente, ou seja, quanto a área de forma, largura da fissura, comprimento das fibras e teor de adição influencia na área de fissuração. O valor apresentado no R-quadrado ajustado foi de 0,821198, ou seja, as variáveis apresentam uma influência de aproximadamente 82,11% na área de fissuração.

Com o mesmo entendimento de variáveis que influenciam na área de fissuração, o valor-P, vai apresentar individualmente qual o grau de influência da variável, ou melhor, pode ser entendido como o grau de importância em relação à área de fissuração. A significação da variável é estabelecida pelos valores abaixo de 0,05 (maior significação) e valores acima de 0,05 (baixa significação).

Em relação aos dados apresentados as variáveis que apresentaram maior influência na área de fissuração foram a área da forma (valor - P = 0,000039) e o comprimento da fibra (valor-P = 0,000416). E a variável que apresentou menor influência foi a largura da fissura (valor-P = 0,916513).

#### **4.3.2. Resultados dos ensaios da placa com restrição na Argamassa (ARG)**

##### **4.3.2.1. Resultados dos ensaios da placa 560 x 350 mm – Argamassa (ARG)**

A Tabela 32 e a Figura 59 apresentam os resultados das larguras médias das fissuras e as taxas de redução destas, para os traços ARGRF<sub>0</sub> e ARGRF<sub>6-12-24mm</sub>.

**Tabela 32:** Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 350 x 560 mm.

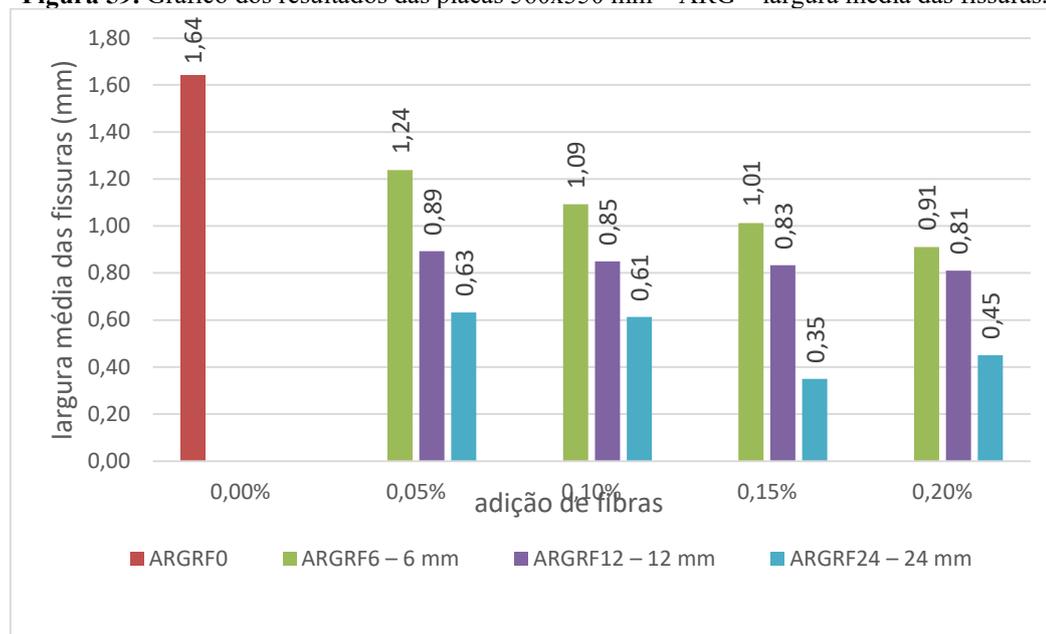
Fibras	Largura média das fissuras (mm) PLACA 560 x 350 mm				
	0	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	1,64	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	1,24	1,09	1,01	0,91
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	0,89	0,85	0,83	0,81
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	0,63	0,61	0,35	0,45

Fibras	Taxa de Redução da largura média das fissuras (mm) PLACA 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	24,54%	33,38%	38,26%	44,51%
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	45,58%	48,17%	49,24%	50,61%
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	61,43%	62,65%	78,66%	72,56%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 59.** Gráfico dos resultados das placas 560x350 mm – ARG – largura média das fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados foi possível verificar que o traço ARGRF<sub>0</sub> apresentou uma largura média de 1,64 mm. Comparado com o traço CAARF<sub>0</sub> houve um aumento de 0,28 mm, ou seja, aumento de aproximado de 20,37%. Todos os traços de ARGRF apresentaram redução da largura das fissuras. Os traços de ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm apresentaram as maiores taxas de redução quando comparado com os traços ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm e ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm.

O traço com maior redução foi do traço ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm com adição de 0,15% que apresentou uma redução média de 78,66%. Entretanto, foi possível observar que houve uma redução no traço ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm com adição de 0,20% quando comparado com a adição de 0,15% de aproximadamente 6,1%, fato esse que pode ser analisado devido à redução no espalhamento e no escoamento causando assim empacotamento das fibras em pontos concentrados.

A maior diferença na redução das larguras ocorreu no traço ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm com as adições de 0,10% e 0,15%, uma diferença de aproximadamente 16,01%. E a menor redução foi apresentada nos traços ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm com a adição 0,20% e o traço ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm com adição 0,05% e no traço ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm nas adições 0,10% e 0,15%, ambas apresentaram uma diferença de 1,07%.

Com base nos resultados das larguras médias das fissuras foram calculadas as áreas médias de fissuração e a taxa de redução. A Tabela 33 e a Figura 60 apresentam os respectivos resultados.

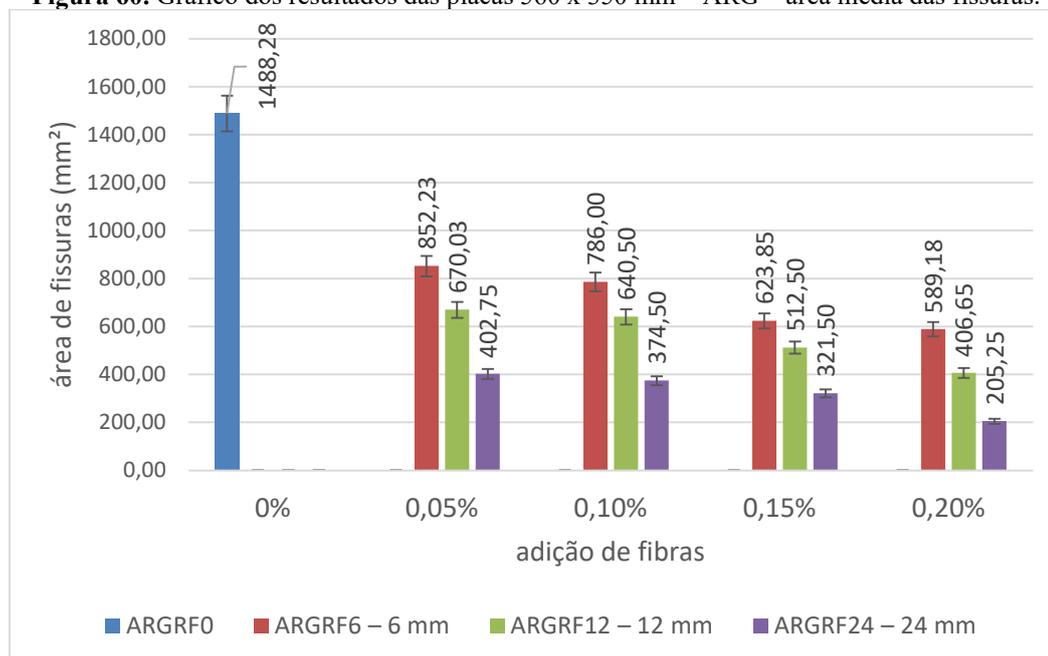
**Tabela 33:** Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 560 x 350 mm.

Fibras	Área de Fissuração (mm <sup>2</sup> )				
	Placa 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	1488,28	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	852,23	786,00	623,85	589,18
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	670,03	640,50	512,50	406,65
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	402,75	374,50	321,50	205,25

Fibras	Taxa de Redução da Área de Fissuração (%)				
	Placa 560 x 350 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	42,74%	47,19%	58,08%	60,41%
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	54,98%	56,96%	65,56%	72,68%
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	72,94%	74,84%	78,40%	86,21%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 60.** Gráfico dos resultados das placas 560 x 350 mm – ARG – área média das fissuras.

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo os resultados, o traço ARGRF<sub>0</sub> apresentou uma área de fissuras de aproximadamente 1488,28mm<sup>2</sup>. Quando comparado ao traço de CAARF<sub>0</sub> foi observado um aumento de 286,98mm<sup>2</sup> (23,89%). Os traços de ARGRF apresentaram uma redução das áreas de fissuração quando comparado com o ARGRF<sub>0</sub>.

O traço ARGRF24 – 24 mm apresentou os maiores resultados de redução de área de fissuração quando comparado aos traços ARGRF6 – 6 mm e ARGRF21 – 12 mm.

Outro ponto que foi possível observar, por meio da análise dos resultados, foram que, as maiores diferenças de redução, ocorreram em todos os traços a partir da adição de 0,15%.

#### 4.3.2.2. Resultados dos ensaios da placa 300 x 300 mm – ARG

Em relação aos ensaios das placas 300 x 300 mm dos traços de ARG os resultados podem ser verificados na Tabela 34 e na Figura 61.

**Tabela 34:** Resultados das larguras médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 300 x 300 mm.

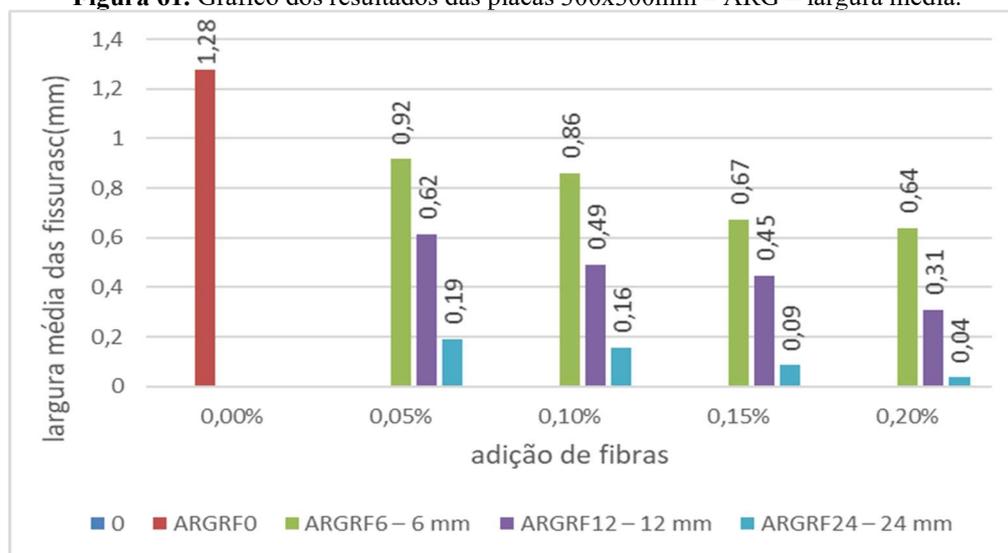
Fibras	Largura média das fissuras (mm) PLACA 300 X 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	1,28	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	0,92	0,86	0,67	0,64
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	0,62	0,49	0,45	0,31
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	0,19	0,16	0,09	0,04

Fibras	Taxa de Redução da largura média das fissuras (mm) PLACA 300 X 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	28,32%	32,81%	47,46%	50,00%
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	51,95%	61,72%	65,04%	75,98%
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	84,96%	87,70%	93,36%	97,27%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 61.** Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – ARG – largura média.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao resultado da largura média de fissuração o traço ARGRF<sub>0</sub> apresentou uma largura de 1,28 mm, quando comparado com o resultado da placa 560 x 350 mm apresentou uma redução de aproximadamente de 0,36mm, em relação a largura média de fissuração.

Entretanto, quando comparado com a mesma placa do CAARF<sub>0</sub> apresentou um aumento de 0,45 mm, ou seja, um aumento de aproximadamente 53,29%.

Os traços que apresentaram maior taxa de redução foi o ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm com

uma média de redução de 90,82%. A adição de 0,20% apresentou a maior porcentagem de redução, uma média de 97,27%, com essa taxa de redução, para mapear as fissuras foi necessário a utilização de lupas de aumento.

A Tabela 35 e a Figura 62 apresentam os resultados das áreas médias de fissuração das placas nas dimensões 300x300 mm para os traços ARGRF<sub>0</sub> e demais ARGRF com adições.

**Tabela 35:** Resultados das áreas médias de fissuração e da taxa de redução da argamassa em relação ao teor de adição de fibras de polipropileno nas placas 300 x 300 mm.

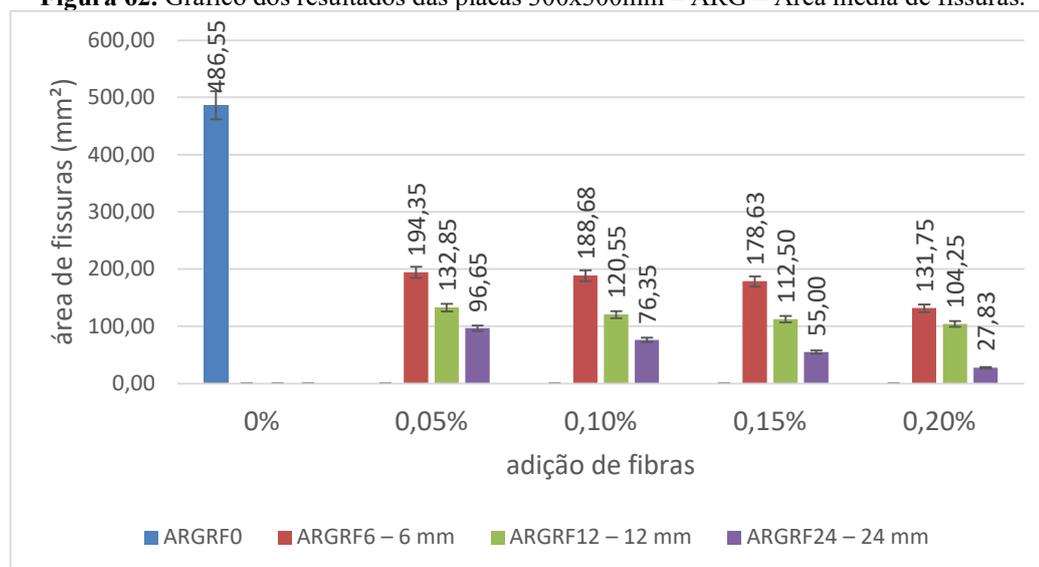
Fibras	Área de Fissuração (mm <sup>2</sup> ) Placa 300 x 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	486,55	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	194,35	188,68	178,63	131,75
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	132,85	120,55	112,50	104,25
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	96,65	76,35	55,00	27,83

Fibras	Taxa de Redução da Área de Fissuração (%) Placa 300 x 300 mm				
	0%	0,05%	0,10%	0,15%	0,20%
ARGRF <sub>0</sub>	0	0	0	0	0
ARGRF <sub>6</sub> – 6 mm	0	60,06%	61,22%	63,29%	72,92%
ARGRF <sub>12</sub> – 12 mm	0	72,70%	75,22%	76,88%	78,57%
ARGRF <sub>24</sub> – 24 mm	0	80,14%	84,31%	88,70%	94,28%

Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 62.** Gráfico dos resultados das placas 300x300mm – ARG – Área média de fissuras.



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo os resultados apresentados a área média de fissuração da ARGRF<sub>0</sub> foi de 486,55 mm<sup>2</sup> e 1001,73 mm<sup>2</sup> menor quando comparado com o resultado da placa 560 x 350 mm. Contudo, quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub> placa 300x300 mm apresentou um aumento de 111,52 mm<sup>2</sup> na área de fissuração.

Em relação aos traços com adição os resultados apresentaram uma redução em todas as combinações. O traço ARGRF<sub>6</sub> – 6mm apresentou uma redução média de 64,37%, quando comparado com o ARGRF<sub>0</sub>.

Os traços ARGRF<sub>12</sub> – 12mm apresentaram uma média de 75,84%, quando comparado com o traço ARGRF<sub>0</sub>.

As maiores reduções foram apresentadas nos traços de ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm com uma média de 86,86%, sendo o traço com adição 0,20% apresentou a maior redução 94,28%. Entretanto quando comparado com CAARF<sub>24</sub> - 24 mm (adição de 0,15%) os valores foram muito próximos. Fato este que pode ser explicado devido ao processo de espalhamento que ocorre ao longo da moldagem das peças. O comprimento das fibras influencia neste processo dificultado a perfeita distribuição causando resultados similares em adições acima de 0,15%.

#### **4.3.2.3. Análise comparativa e resultados correlacionados das placas de ARG**

A Tabela 36 apresenta os resultados das comparações entre as placas ARGRF<sub>0</sub>. Em relação a largura média das fissuras foi possível verificar que a placa 300 x 300mm apresentou uma redução de 0,36mm (21,95%) quando comparado com a placa 560 x 350 mm. No que se refere à área média de fissuras, a placa 300 x 300mm apresentou uma redução de 1001,73 mm<sup>2</sup> quando comparado com a placa 560 x 350 mm, ou seja, aproximadamente 67,31%.

Entretanto, quando comparado com as placas de CAARF<sub>0</sub> em relação a redução da área média de fissuração os valores foram bem similares, o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou um valor de 68,78%.

**Tabela 36:** Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF<sub>0</sub>.

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	redução da área placa		Largura média fissuras (mm)	redução da largura média das fissuras		Área média fissuras (mm <sup>2</sup> )	redução da área média das fissuras	
		mm <sup>2</sup>	%		mm	mm		%	mm <sup>2</sup>
560x350	196000	106000	54,08%	1,64	0,36	21,95%	1488,28	1001,73	67,31%
300x300	90000			1,28			486,55		

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados comparativos do traço ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm entre as placas 560 x 350 mm e 300 x 300mm podem ser observados na Tabela 37. Em relação a largura das fissuras, o traço que mais apresentou diferença foi com adição de 0,15% com uma diferença aproximada de 33,58%. Outro ponto que foi possível observar foi em relação da área de fissuração que apresentou uma média de diferença entre as placas de aproximadamente 75,55%. O coeficiente de Pearson apresentou um valor de 0,88, ou seja, representa uma correlação forte.

**Tabela 37:** Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Fibras (mm)	adição das fibras (%)	Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras		redução da área média das fissuras		Coeficiente de correlação PEARSON
				mm	mm	mm	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%	
560x350	196.000,00	6	0,05	1,24	0,32	25,86%	852,23	657,88	77,19%	0,88		
300x300	90.000,00		0,05	0,92								
560x350	196.000,00		0,10	1,09	0,23	21,28%	786,00	597,33	76,00%			
300x300	90.000,00		0,10	0,86								
560x350	196.000,00		0,15	1,01	0,34	33,58%	623,85	445,23	71,37%			
300x300	90.000,00		0,15	0,67								
560x350	196.000,00		0,20	0,91	0,27	29,67%	589,18	457,43	77,64%			
300x300	90.000,00		0,20	0,64								

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 38 apresenta a matriz de correlação do traço ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm, a maior correlação apresentada nos resultados ocorreu entre as áreas da placa e área médias fissuras, um coeficiente de 0,959307, ou seja, uma correlação muito forte. A correlação entre a área da placa e a largura média das fissuras apresentou o menor valor de correlação 0,773362. Ainda assim, pode ser considerada uma correlação forte

**Tabela 38:** Resultados da matriz de correlação – ARGRF<sub>6</sub> – 6mm.

	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Largura média fissuras	Área média fissuras
Área da placa (mm <sup>2</sup> )	1		
Largura média fissuras	0,78	1	
Área média fissuras	0,96	0,88	1

Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 39 o traço ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm apresentou coeficiente de correlação PEARSON de 0,75, que pode ser considerado como uma correlação forte.

O traço com adição de 0,20% apresentou a maior diferença entre as placas, uma média de 62,04% representando uma redução de 0,50 mm.

Em relação a área média de fissuração a adição de 0,10% apresentou a maior diferença entre as placas, 81,18% que apresentou uma redução de 519,95. Entretanto, quando comparado com CAARF<sub>12</sub> – 12 mm com a mesma adição os resultados são similares. O traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm com adição de 0,10% apresentou uma redução de 85,02%.

A redução média das áreas de fissuras entre as placas do traço ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm foi de aproximadamente 78,44%.

**Tabela 39:** Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF<sub>12</sub> – 12 mm.

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Fibras (mm)	adição das fibras (%)	Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras		redução da área média das fissuras		Coeficiente de correlação PEARSON
				mm	mm	mm	%	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	%		
560x350	196.000,00	12	0,05	0,89	0,27	30,33%	670,03	537,18	80,17%	0,75		
300x300	90.000,00		0,05	0,62								
560x350	196.000,00		0,10	0,85	0,36	42,35%	640,50	519,95	81,18%			
300x300	90.000,00		0,10	0,49								
560x350	196.000,00		0,15	0,83	0,39	46,25%	512,50	400,00	78,05%			
300x300	90.000,00		0,15	0,45								
560x350	196.000,00		0,20	0,81	0,50	62,04%	406,65	302,40	74,36%			
300x300	90.000,00		0,20	0,31								

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo os resultados apresentados pela matriz de correlação que está na Tabela 40, a correlação que pode ser classificada como muito forte ocorre entre área da placa e área

média das fissuras, com o valor de 0,96. As correlações, área da placa e largura média das fissuras (0,77) e largura média das fissuras e área média das fissuras (0,88) foram classificadas como correlações fortes.

**Tabela 40:** Resultados da matriz de correlação – ARGRF<sub>12</sub> – 12mm.

	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Largura média fissuras	Área média fissuras
Área da placa (mm <sup>2</sup> )	1		
Largura média fissuras	0,77	1	
Área média fissuras	0,96	0,88	1

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Os traços ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm apresentaram o maior coeficiente de correlação de PEARSON, valor de 0,94. Apesar que quando comparado com os traços CAARF<sub>24</sub> – 24 mm, apresenta um valor 0,05 menor. A Tabela 41 apresenta os resultados comparativos das placas.

No que se refere a largura média de fissuras as adições 0,20% apresentaram a maior diferença entre as placas, uma média de 92,22%, 47,78% maior que quando comparado com a placas CAARF<sub>24</sub> – 24 mm nas mesmas condições.

**Tabela 41:** Resultados comparativos entre as 560 x 350 mm e 300 x 300 mm – ARGRF<sub>24</sub> – 24 mm.

Placas (mm)	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Fibras (mm)	adição das fibras (%)	Largura média fissuras		redução da largura média das fissuras		Área média fissuras mm <sup>2</sup>	redução da largura média das fissuras		Coeficiente de correlação PEARSON
				mm	mm	mm	%		mm <sup>2</sup>	%	
560x350	196.000,00	24	0,05	0,63	0,44	69,57%	402,75	306,10	76,00%	0,94	
300x300	90.000,00		0,05	0,19			96,65				
560x350	196.000,00		0,10	0,61	0,46	74,29%	374,50	298,15	79,61%		
300x300	90.000,00		0,10	0,16			76,35				
560x350	196.000,00		0,15	0,35	0,27	75,71%	321,50	266,50	82,89%		
300x300	90.000,00		0,15	0,09			55,00				
560x350	196.000,00		0,20	0,45	0,42	92,22%	205,25	177,43	86,44%		
300x300	90.000,00		0,20	0,04			27,83				

**Fonte:** Elaborado pelo autor

A matriz de correlação do traço do ARGRF<sub>24</sub> – 24mm apresentada na Tabela 42 pode ser classificada como uma correlação muito forte, pois todas as correlações estabelecidas entre área da placa, largura média das fissuras e área média das fissuras apresentaram valores acima de 0,90.

**Tabela 42:** Resultados da matriz de correlação – ARGRF<sub>24</sub> – 24mm.

	Área da placa (mm <sup>2</sup> )	Largura média fissuras	Área média fissuras
Área da placa (mm <sup>2</sup> )	1		
Largura média fissuras	0,90	1	
Área média fissuras	0,92	0,94	1

Fonte: Elaborado pelo autor

A interação de todas as variáveis envolvidas que possam influenciar na área de fissuração dos traços de ARGRF<sub>0</sub> e com adição estão na Tabela 43.

**Tabela 43:** Resultados da análise de regressão ARG – ANOVA.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0,96							
R-Quadrado	0,93							
R-quadrado ajustado	0,91							
Erro padrão	73,27							
Observações	25							
ANOVA								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
<b>Regressão</b>	4	1371867	3E+05	63,88	4E-11			
<b>Resíduo</b>	20	107368,64	5368					
<b>Total</b>	24	1479235,60						
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
<b>Interseção</b>	366,67954	179,41934	2,044	0,05438	-7,583	740,94172	7,58264	740,94
<b>área placa</b>	0,0046609	0,0006273	7,43	3,6E-07	0,0034	0,0059696	0,00335	0,006
<b>largura fissura comprimento fibra</b>	-270,5359	184,04197	-1,47	0,15713	-654,4	113,36891	654,441	113,37
<b>fibra</b>	-23,083273	6,5399172	-3,53	0,00211	-36,73	-9,441244	36,7253	-9,4412
<b>adição fibra</b>	-1653,5175	440,52395	-3,754	0,00125	-2572	-734,6006	2572,43	-734,6

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio dos dados apresentados a regressão pode ser validada tendo em vista que o F de significação apresentou valor abaixo de 0,05 e o R-quadrado ajustado representa aproximadamente 91,28% da influência das variáveis em relação à área de fissuração.

As variáveis que mais representam influência na área de fissuração podem ser analisadas pelos valores do valor-P, ou seja, valor-P abaixo de 0,05 representam maior influência.

Em relação aos traços ARGRF<sub>24</sub> – 24mm as variáveis que apresentam maiores influência em relação à área de fissuração são área da placa (0,000036) e a adição de fibras (0,00125).

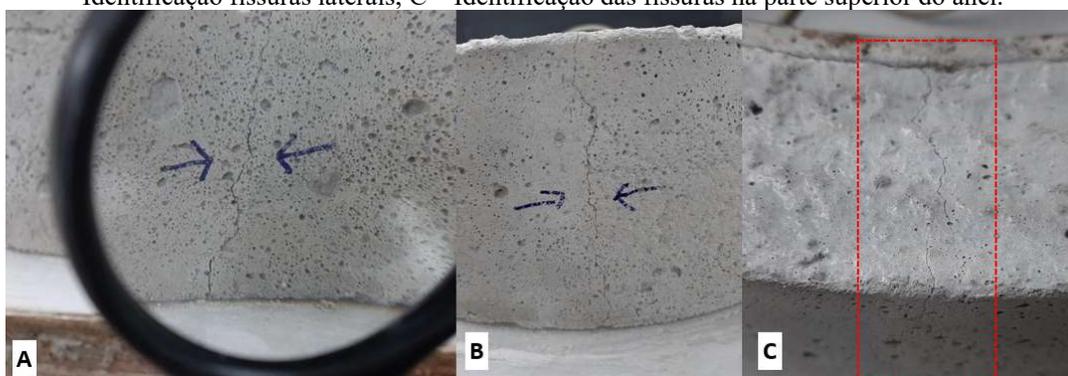
#### 4.4. Resultados dos ensaios do anel com restrição

Estão apresentados neste item os resultados obtidos nos ensaios dos anéis do CAARF e da ARGRF, utilizando o anel de acordo com as dimensões da norma ASTM C1581:2016 e um anel reduzido para analisar as possíveis correlações.

Para a elaboração dos gráficos e visando facilitar a interpretação dos dados foram utilizadas as deformações médias ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ ) por dia por meio da leitura dos extensômetros.

Após a leitura da idade de fissura do anel, foi realizada a identificação visual e medida a largura de cada fissura, quando possível, utilizando a régua de fissuras. As Figuras 63 e 64 apresentam um exemplo deste procedimento.

**Figura 63.** Exemplos da identificação das fissuras no ensaio do anel; A – Uso de lentes de aumento (lupa); B – Identificação fissuras laterais; C – Identificação das fissuras na parte superior do anel.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 64.** Exemplos da identificação das fissuras no ensaio do anel; A – Fissuras traço ARGRF<sub>0</sub>; B – Exemplos das Fissuras traço ARGRF<sub>6</sub>– 0,05%; C – Uso da régua de fissuras para medição da largura.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### **4.4.1. Resultado dos ensaios com anel – CAA**

##### **4.4.1.1. Resultados do ensaio do anel com restrição CAA – ANEL ASTM C1581:2016**

Os resultados médios da leitura dos extensômetros apresentam a deformação do anel ao longo de um período de tempo (30 dias).

Segundo os resultados apresentados é possível verificar que todos os traços possuem uma característica similar. Possuem um período de compressão do anel, um ponto de queda na deformação e depois um relaxamento desta tensão.

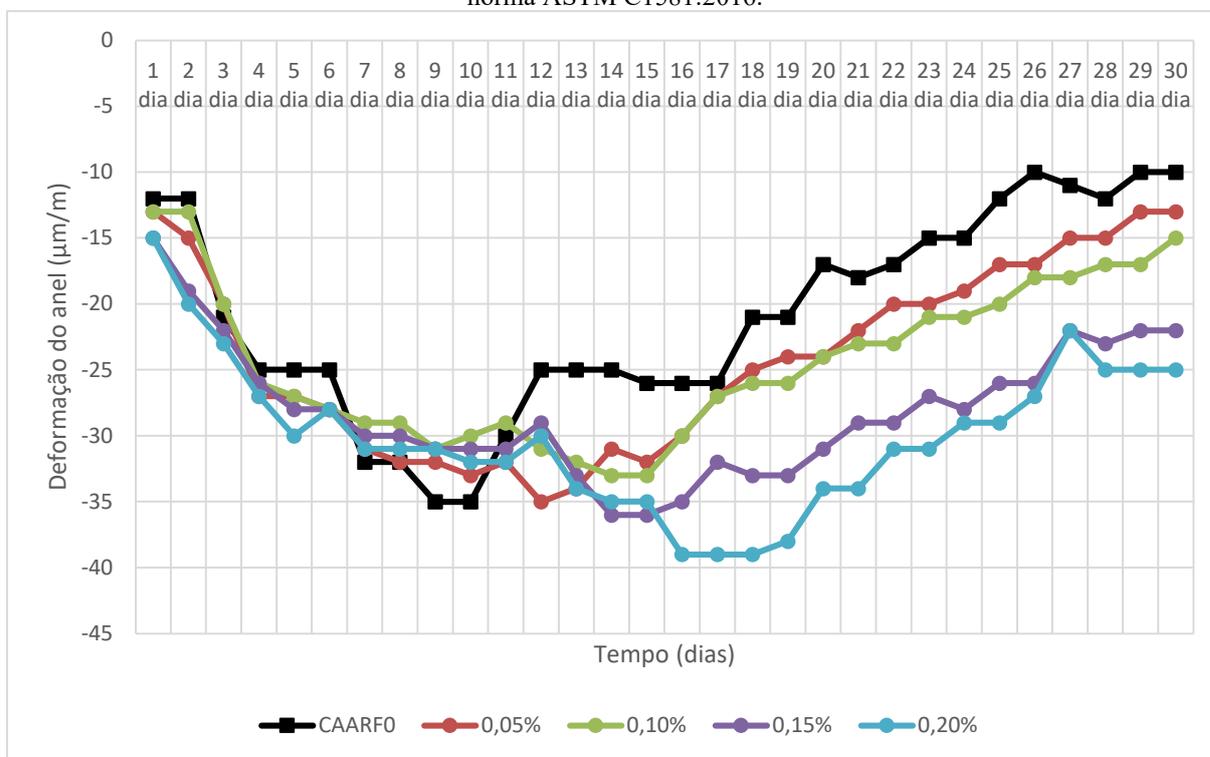
É possível verificar que até o 13º dia os traços de CAARF apresentaram um padrão de deformação do anel em relação ao tempo. Contudo entre o 14º dia e 19º dia os traços começam a apresentar as diferenças individuais referente a cada traço realizado.

Visando facilitar a interpretação de dados, identificação da possível idade da fissura e estabelecer uma análise comparativa entre o CAARF<sub>0</sub> com os traços CAARF com adições, foram realizados gráficos separados por comprimento das fibras e teor de adição.

A Figura 65 apresenta os resultados comparativos entre o ensaio do anel dos traços CAARF<sub>0</sub> e CAARF<sub>6</sub> – 6 mm.

Em relação ao traço CAARF<sub>0</sub> a variação de deformação pode ser verificada entre o 9º e 10º dia, ou seja, a mudança repentina na deformação corresponde a idade da fissuração visível na amostra.

**Figura 65.** Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF<sub>6</sub> – 6mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.



Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao traço CAARF<sub>6</sub> – 6mm -0,05% a variação da deformação foi verificada o 12º e 13º dia do início do ensaio do anel, uma diferença de 3 dias aproximadamente quando comparado com o CAARF<sub>0</sub>. Os traços CAARF<sub>6</sub> – 6mm -0,10% e 0,15% apresentaram valores para a idade de fissura similares, entre o 14º e 15º dia de ensaio, adiando o surgimento da fissura em média de 4,5 dias quando comparado com o CAARF<sub>0</sub>.

O traço com adição de 0,20% apresentou uma variação na deformação do anel entre o 16º e 18º dia do ensaio, retardando o surgimento das fissuras em aproximadamente 7,5 dias comparado com o CAARF<sub>0</sub>.

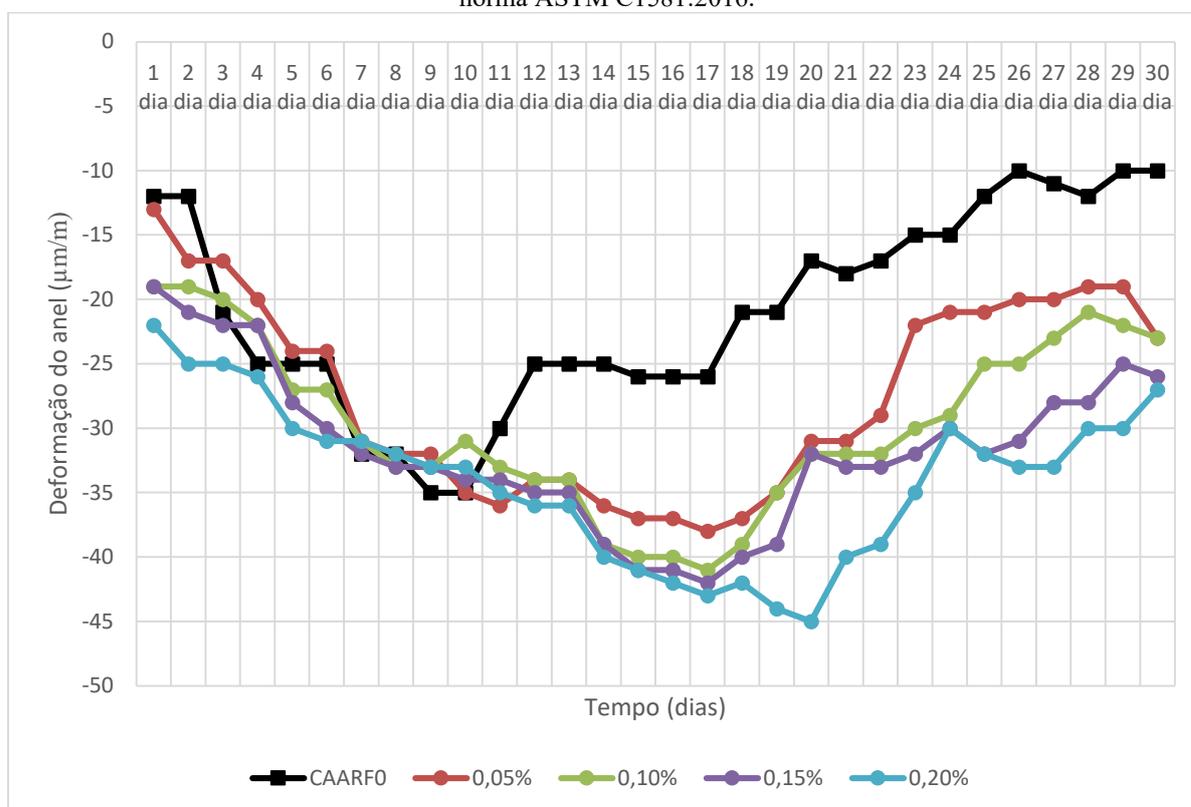
Os pontos de surgimento de fissuras não apresentaram um local específico, em cada traço foi possível verificar o surgimento das fissuras em locais diferentes do anel. As larguras médias das fissuras variam entre 0,30 e 0,40 mm.

Os resultados da idade média das fissuras do traço CAARF<sub>12</sub> – 12mm, estão na Figura 66. O traço com adição 0,05% e 0,10% apresentaram uma idade média de fissura aproximadamente 17,5 dias após o início do ensaio, ou seja, 7,5 dias quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub>. Em relação ao traço com adição de 0,15% a idade média da fissura apresentou entre o 17º e 18º dia.

A idade média de fissura do traço com adição de 0,20% se deu entre 19º e 21º dia do início do ensaio, ou seja, aproximadamente 11 dias quando comparado com o traço de CAARF<sub>0</sub>.

Em relação a deformação do anel verificou-se que para os pontos previstos para idade de fissuração a deformação variou de -35 para -45  $\mu\text{m}/\text{m}$ . As fissuras não apresentaram um padrão de abertura a largura média da fissura foi de 0,20 a 0,30 mm.

**Figura 66.** Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF<sub>12</sub> – 12mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.



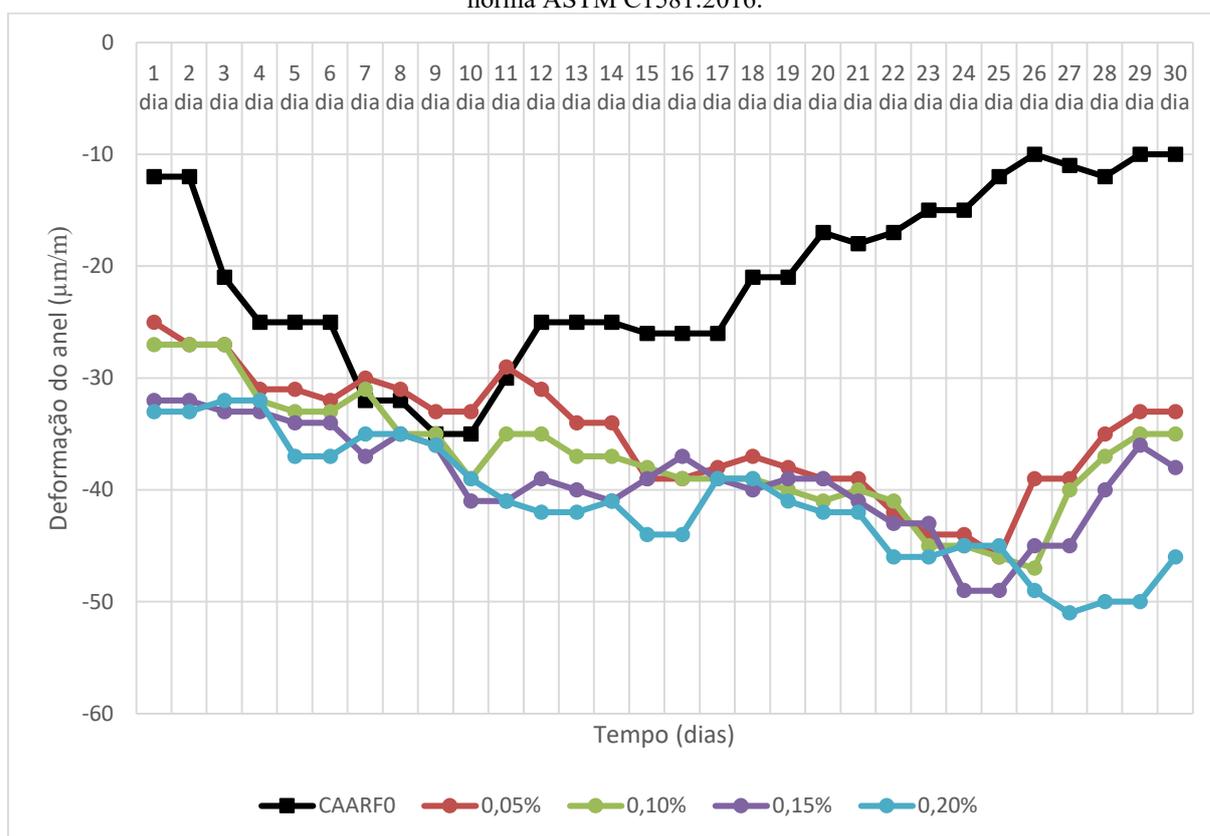
Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados na Figura 67 o traço CAARF<sub>24</sub> – 24mm apresentou uma idade média de fissuração entre o 24º e 28º dia após o início do ensaio do anel. Em relação a adição 0,05% e 0,15% apresentaram uma idade de fissura entre 24º e 25º dia, e as adições 0,10% a idade de fissura se apresentou entre 25º e 27º dia, e nas adições 0,20% entre 26º e 28º dia. Tendo em vista as possíveis variações que podem ocorrer ao longo dos ensaios, como variações de temperatura, umidade relativa do ar, variação na leitura dos extensômetros, no traço CAARF<sub>24</sub> – 24mm não foi possível estabelecer uma precisão na idade das fissuras, tendo em vista a dificuldade visual na identificação.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a dificuldade encontrada na

moldagem do anel tendo em vista a influência das fibras no escoamento do CAA, fato esse que pode ter gerado vazios na CAA causando assim uma imprecisão na medição.

**Figura 67.** Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF<sub>24</sub> – 24mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.4.1.2. Resultados dos ensaios do anel com restrição CAA – ANEL REDUZIDO

Os resultados médios da leitura dos extensômetros apresentam a deformação do anel reduzido ao longo de um período de tempo (30 dias). Segundo os resultados apresentados é possível verificar que todos os traços possuem uma característica similar, com alguns picos entre o 9º e 10º dia. Nota-se também que entre o 1º ao 3º dia de ensaio o CAA apresentou um ponto de expansão, resultante do início do processo de endurecimento e, longo após, iniciou a fase de compressão.

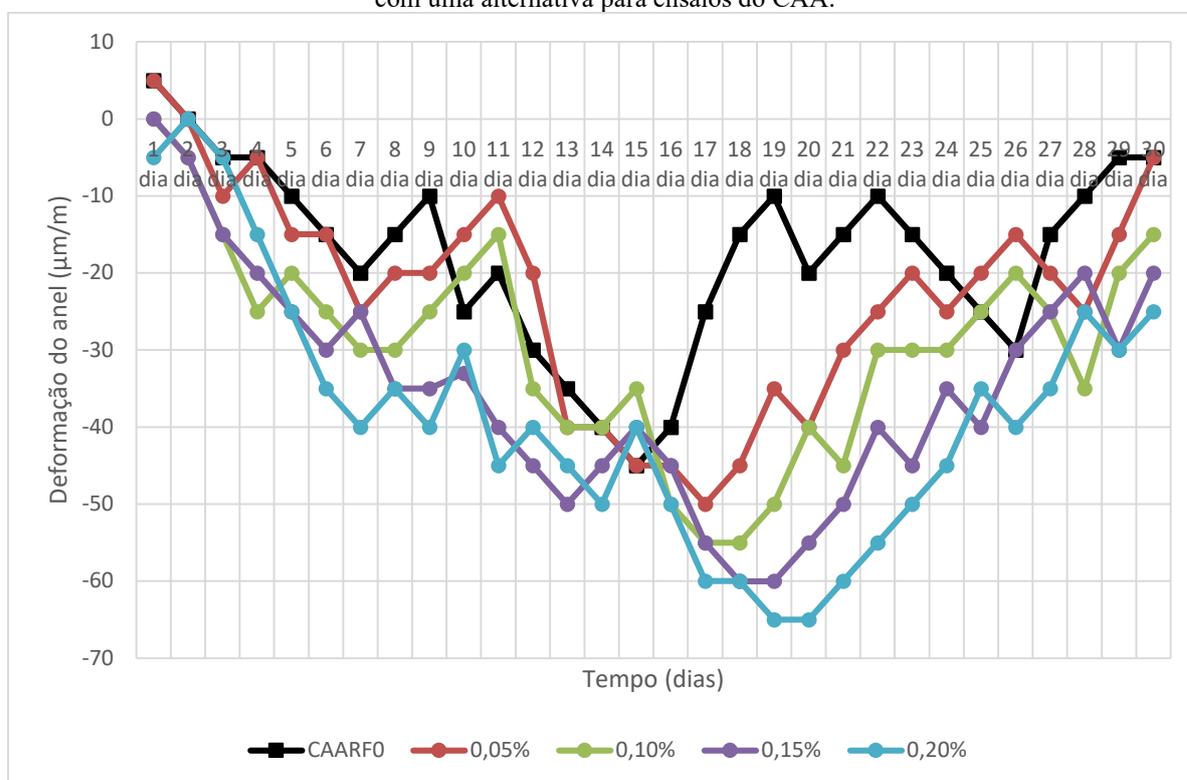
Entre o 13º ao 15º os traços de CAA começaram a apresentar variação na

deformação, devido as suas características individuais e peculiaridades de cada traço.

Com o objetivo de facilitar a interpretação de dados, a identificação da possível idade de fissura e estabelecer uma análise comparativa entre o CAARF<sub>0</sub> e os traços CAARF com adições, foram realizados gráficos separados por comprimento das fibras e teor de adição.

Os resultados dos ensaios do anel reduzido do traço CAARF<sub>0</sub> e do traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm podem ser verificados na Figura 68.

**Figura 68.** Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF<sub>6</sub> – 6mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios do CAA.



Fonte: Elaborado pelo autor

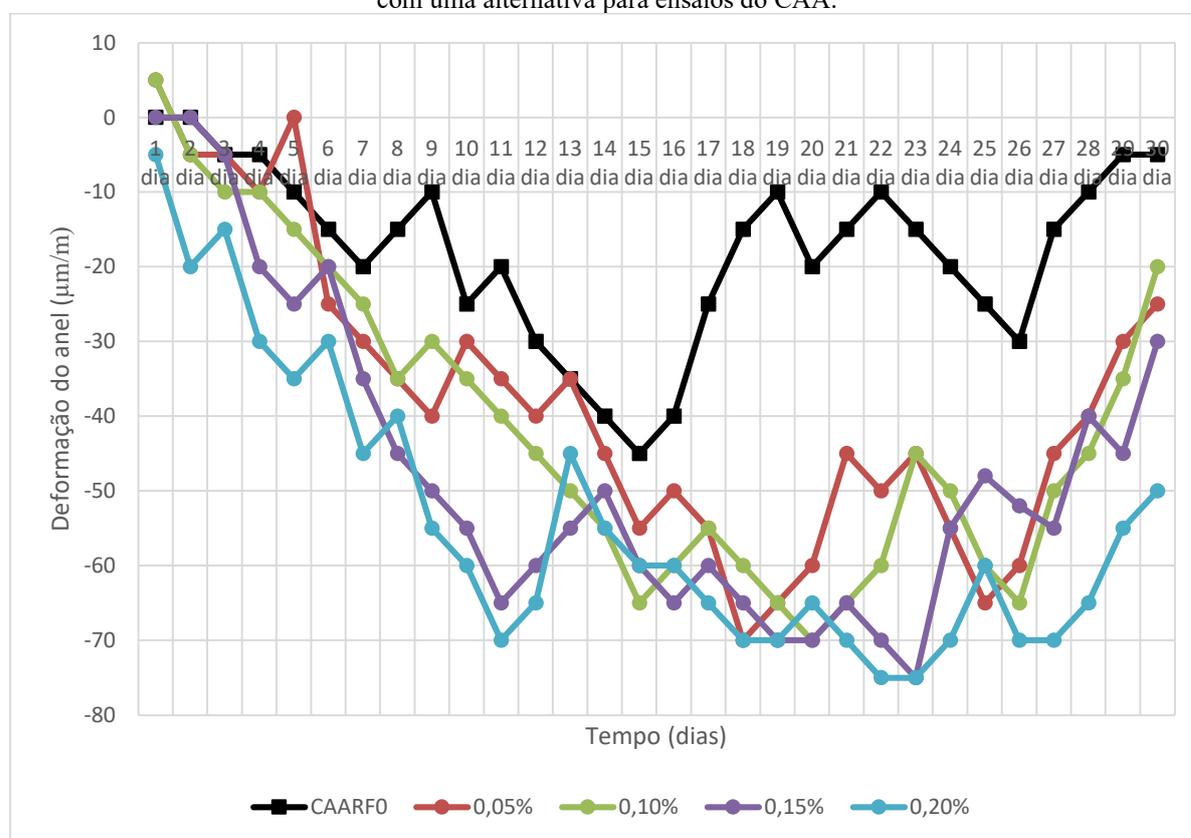
Segundo os resultados apresentados o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou uma idade média de fissura entre o 14º ao 15º dia e apresentou uma deformação média do anel reduzido que variou entre 0 e -45 µm/m. Quando comparado com os resultados do anel (ASTM), foi possível verificar uma diferença de 4,5 dias entre os ensaios.

Em relação aos resultados do traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm com adição de 0,05% quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub> apresentou um retardo para o surgimento da fissura de 1,5 dia de diferença, ou seja, uma idade média de fissura entre o 16º e 17º dias. Essa idade se repete para as adições com 0,10%.

Nos traços com adições de 0,15% e 0,20% a idade média de fissura ocorre entre o 17º e 18º dia, apresentando uma diferença de aproximadamente 2,5 dias quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub>.

A Figura 69 apresenta os resultados da idade média de fissura do traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm. Segundo os resultados a idade média de fissura ocorreu entre os 18º e 23º dias de ensaio, com deformação do anel variando de 5 à -75 µm/m.

**Figura 69.** Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF<sub>12</sub> – 12mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios do CAA.



Fonte: Elaborado pelo autor

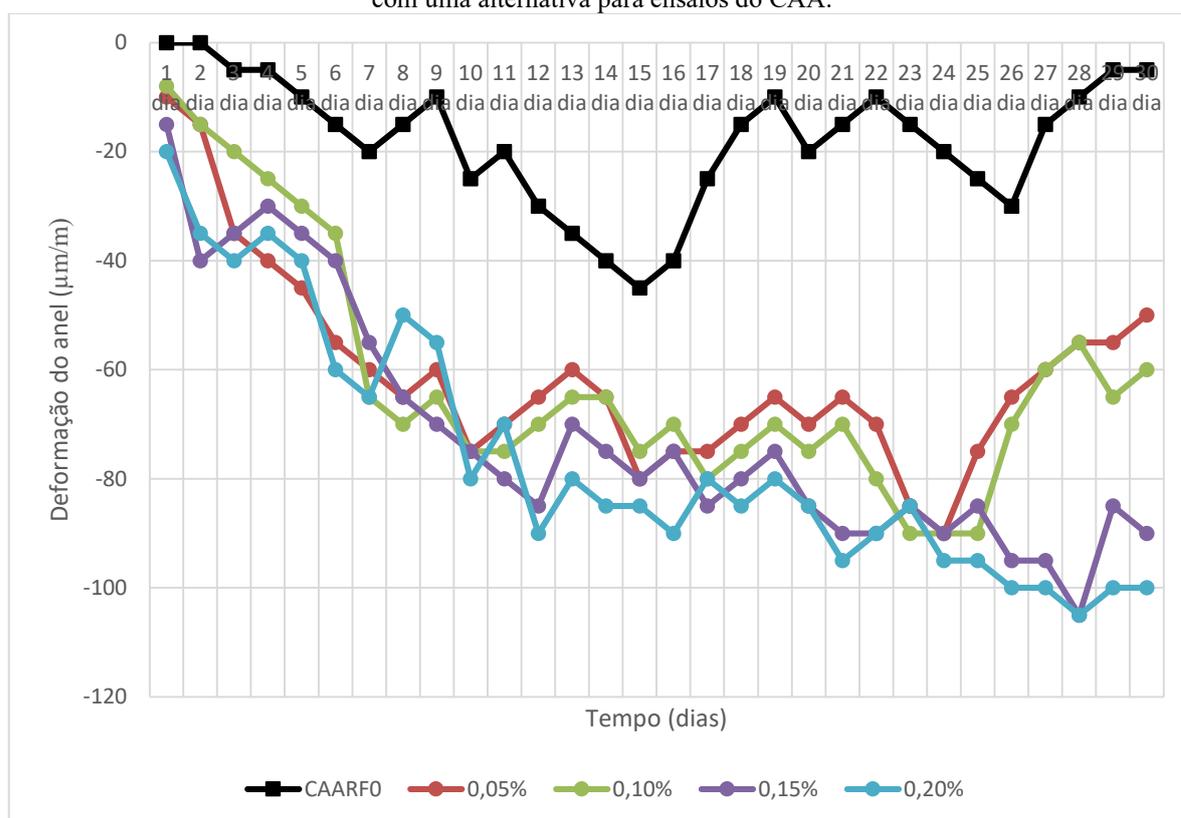
Em relação ao traço com adição de 0,05% a idade média de fissura ocorreu entre 18º e 19º dia, muito similar com o traço de 0,10% onde a idade média de fissura se apresentou entre 19º e 20º, ressalta-se que as deformações tiveram a mesma variação -70 e -75 µm/m.

Os traços com adição de 0,15% e 0,20% apresentaram praticamente as mesmas variações, idade média da fissura entre 22º e 23º dia com uma deformação média do anel variando entre -70 e -75 µm/m. Quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub> o surgimento da

idade média da fissura apresentou um retardo médio de 5 dias.

Os resultados do traço CAARF<sub>24</sub> – 24 mm estão na Figura 70. De acordo com os resultados apresentados a deformação do anel variou de 0 a -105  $\mu\text{m/m}$  apresentando uma idade média de fissuras entre o 23<sup>o</sup> e 29<sup>o</sup>.

**Figura 70.** Gráfico da deformação x idade de fissura CAARF<sub>24</sub>– 24mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios do CAA.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os traços com adições de 0,05% e 0,10% apresentaram resultados similares, ou seja, apresentaram uma idade média de fissuras entre 23<sup>o</sup> e 24<sup>o</sup> dia após o início do ensaio com uma deformação do anel variando de -85 à -90  $\mu\text{m/m}$ . Para os traços com adição de 0,15% e 0,20% não foi verificado uma variação significativa entre os resultados, tendo em vista que a idade média de fissura ocorreu entre o 27<sup>o</sup> e 29<sup>o</sup> dia e a deformação variou entre -95 a -105  $\mu\text{m/m}$ .

Importante ressaltar que para o traço CAARF<sub>24</sub> – 24 mm não foi possível identificar visualmente o surgimento das fissuras no anel. Fato esse que está relacionado com a redução da dimensão do anel e o aumento do comprimento das fibras. Observa-se o alinhamento das fibras, principalmente com as fibras de 24 mm, aumentando a tensão da

deformação do anel, restringido o efeito da retração e por consequência o surgimento das fissuras.

Outros autores também obtiveram resultados semelhantes a esta pesquisa. Borges, Motta e Pinto (2019) avaliaram a retração por secagem segundo a ASTM C1581M:2016, de concretos com diferentes tipos de fibras: 0,25% e 0,5% de fibras vegetais (Sisal e Rami) e 0,25% de fibra de polipropileno. Segundo os resultados encontrados a deformação do anel apresentou uma variação de 0 até -80  $\mu\text{m}/\text{m}$ . O traço de referência apresentou uma deformação variando -10 a -60  $\mu\text{m}/\text{m}$  com uma idade média de surgimento de fissura no 6º dia de ensaio. Para o traço com adição de fibras de polipropileno a deformação do anel apresentou uma variação entre -5 a -40  $\mu\text{m}/\text{m}$  com uma idade média de surgimento de fissuras nos 3,6 dias de ensaio.

Yousefieh et al. (2017) avaliaram o desempenho do concreto com diferentes fibras quanto a retração. Verificaram para o concreto com fibras de polipropileno, no ensaio do anel, a deformação máxima de 30,02  $\mu\text{m}/\text{m}$ . O surgimento da fissura se deu as 66 horas de ensaio.

Ehrenbring, Gil e Tutikian (2018a) ao estudarem a adição de 0,50% de fibras poliméricas (polipropileno, álcool polivinílico e poliéster reciclado) em relação ao volume do concreto, verificaram que: o traço de referência apresentou uma deformação de 33,94  $\mu\text{m}/\text{m}$  no 13º dia de aparecimento da fissura; o traço contendo somente fibras de polipropileno o aparecimento da fissura se deu no 14º dia e a deformação foi de 31,19  $\mu\text{m}/\text{m}$ ; o traço contendo 30% de fibra de polipropileno e 70% de poliéster as fissuras apareceram ao 10º dia e a deformação foi de 49,25  $\mu\text{m}/\text{m}$  e o traço contendo 30% de fibra de polipropileno e 70% de polivinílico as fissuras apareceram ao 13º dia e a deformação foi de 47,39  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Ehrenbring, Tutikian e Quirino (2018b) ao ensaiarem concreto de traço, em massa, 1,0: 2,0: 2,5 (cimento: areia: brita) com 0,30% do seu volume de fibras poliéster novas e recicladas, verificaram que o concreto sem fibras apresentou picos de tensão na faixa de 70 a 80  $\text{N}/\text{cm}^2$ , obtendo um alívio brusco no 15º dia. O concreto com fibras novas de poliéster apresentou o pico de tensão entre o 7º e o 9º dia nas duas amostras analisadas e, comparando-se com concreto referência, teve aumento de quase 100% das tensões de retração. O concreto com fibras recicladas apresentou um alívio das tensões no 13º e no 20º dia de ensaio e apresentou tensões de 80 a 160  $\text{N}/\text{cm}^2$ .

Nam et al. (2016) verificaram a retração de concretos com fibras de náilon (19 mm comprimento) e álcool polivinílico (PVA) (12 mm de comprimento) nos teores de 0,05 e

0,10% em relação ao seu volume. Realizaram o ensaio do anel, de diâmetro externo de 400 mm, diâmetro interno 150 mm e altura de 50 mm. A deformação média obtida variou de -100 a -400 retração por secagem ( $\times 10^6$ ) para 30 dias de ensaios. Ainda segundo os autores as fibras contribuíram para o retardo do aparecimento de fissuras quando comparado com os traços de referência, em 8,7% e 11,6% na idade de fissuração.

Altoubat et al. (2017) ao variarem o teor de adição de microssílica e cinzas volantes na composição do CAA observaram que a idade de fissuração se deu entre o 4º e 10º dia com uma deformação do anel da ASTM, variando de 10 na fase expansão até -80  $\mu$ -strain na fase de compressão.

Menu et al. (2017) mediram a retração do concreto convencional variando-se a relação de a/c de 0,45 e 0,60. Observaram que a idade média de fissura se deu entre 3º e o 7º dia. A variação da deformação do anel nos 15 primeiros dias de ensaio foi entre -20 e -80  $\mu$ -strain, chegando à uma deformação máxima de aproximadamente -700  $\mu$ -strain no 70º dia de ensaio.

Briffaut, Benboudjema e D'Aloia (2016) verificaram o efeito da adição das microfibras de polipropileno e de aço no combate ao surgimento das fissuras no processo de retração nas primeiras idades do concreto. Em relação aos traços com adição de microfibras de polipropileno observaram uma expansão do anel de 20  $\mu$ m/m nas primeiras 24 horas e logo depois uma retração no seu estado máximo entorno dos -80  $\mu$ m/m. No caso dos traços com adição das fibras metálicas, a deformação do anel variou entre -20 e -90  $\mu$ m/m aproximadamente.

Shen et al. (2020) mediram por meio do ensaio do anel, a retração do concreto de alta resistência com adição de fibras de polipropileno. Para o ensaio foram realizados traços de referência e com adição de 0,3; 0,6 e 0,9% de fibras de polipropileno em relação ao volume do concreto. O traço sem adição de fibras apresentou a primeira fissura no 10,58º dia de ensaio. Em relação aos traços com adição de fibras os autores observaram um ganho no surgimento das primeiras fissuras. A deformação do anel variou entre -20 e -90  $\mu$ ε.

Da Costa et al. (2019) analisaram a retração e o surgimento de fissuras em compósitos cimentício com adição de fibras de polipropileno e com substituição de 30% do volume do cimento por casa de arroz não processada. Os ensaios foram realizados por meio do anel com restrição em um período de 28 dias. Em relação ao traço de referência os autores observaram uma deformação do anel entre 10 e -80  $\mu$ m/m, para os traços com substituição e

adição de fibras as deformações variando entre 40 e -70  $\mu\text{m/m}$ .

#### 4.4.1.3. Análise comparativa e resultados correlacionados do ensaio dos anéis de CAA

Com o objetivo de avaliar a correlação e um comparativo dos resultados com a redução do anel foram analisadas as seguintes variáveis: idade média das fissuras e o atraso/retardo (dias) para surgimento das fissuras após adição das fibras. A Tabela 44 apresenta os resultados da comparação.

**Tabela 44:** Resultados comparativos entre os ensaios dos anéis – CAA.

Traço	Adição de Fibras	Idade média das fissuras (dias)		Retardo do surgimento da fissura (dias) em relação ao CAARF <sub>0</sub>			
		REDUZIDO	ASTM	REDUZIDO	%	ASTM	%
CAARF <sub>0</sub>	0	14,5	9,5	-	-	-	-
CAARF <sub>6</sub>	0,05%	16,5	12,5	2	13,79%	3	31,58%
	0,10%	16,5	14,5	2	13,79%	5	52,63%
	0,15%	18	14,5	3,5	24,14%	5	52,63%
	0,20%	19	17	4,5	31,03%	7,5	78,95%
CAARF <sub>12</sub>	0,05%	19	17	4,5	31,03%	7,5	78,95%
	0,10%	19,5	17	5	34,48%	7,5	78,95%
	0,15%	22,5	17,5	8	55,17%	8	84,21%
	0,20%	23	20	8,5	58,62%	10,5	110,53%
CAARF <sub>24</sub>	0,05%	23,5	24,5	9	62,07%	15	157,89%
	0,10%	24	26	9,5	65,52%	16,5	173,68%
	0,15%	27,5	24,5	13	89,66%	15	157,89%
	0,20%	28,5	27	14	96,55%	17,5	184,21%

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em relação ao traço CAARF<sub>0</sub> ocorre uma diferença de 5 dias na idade média das fissuras, o anel reduzido apresentou a primeira fissura no 14º dia de ensaio e enquanto o anel segundo as dimensões estabelecidas pela norma ASTM apresentou no 9,5º dia. Esta diferença pode estar vinculada ao fator redução do volume do CAA.

Ressalta-se que é normal e previsto as diferenças entre idade da fissura e a deformação do anel, tendo em vista a geometria da peça e o volume do anel. Entretanto, a referida análise busca uma correlação com a diferença de atraso/retardo do surgimento das fissuras após adição de fibras.

De acordo com os resultados apresentados para o traço CAARF<sub>6</sub> – 6 mm, a idade média do surgimento das fissuras foi similar entre os anéis. O anel reduzido apresentou uma média de 17,5 dias e o anel ASTM 14,6 dias, uma diferença de 2,8 aproximadamente. Houve um ganho na idade de fissura variando de 2 a 4,5 dias.

No caso do traço CAARF<sub>12</sub> – 12 mm para o anel reduzido, em relação as adições de 0,05% e 0,10% houve uma diferença numérica de 0,5 dia, o mesmo se aplicada aos traços com 0,15% e 0,20%. As diferenças no caso do anel ASTM nos traços com adição de 0,05% e 0,10% apresentaram valores iguais, fato que pode ser entendido devido o alinhamento que ocorre entre as fibras dentro do anel proporcionando uma instabilidade na leitura para prever idade mais precisa do surgimento das fissuras.

Os traços CAARF<sub>24</sub> – 24 mm no que se refere ao anel reduzido é possível verificar que as diferenças são insignificantes para as adições 0,05 e 0,10% e no caso das adições 0,15% e 0,20% houve uma diferença de 1 dia, tendo em vista as variações que ocorrem ao longo do ensaio. Pode-se concluir que houve um ganho de idade entre 13 e 14 dias, para estes traços quando comparado com o traço CAARF<sub>0</sub>. Entretanto em relação ao anel ASTM houve uma variação entre 15 e 17,5 dias de ganho na idade de surgimento de fissuras quando comparado com o traço de referência. As adições 0,05% e 0,15% apresentaram um ganho de 15 dias no surgimento das fissuras e as adições com 0,10% e 0,20% a diferença de ganho ocorre entre 16º e 17,5º dia do ensaio.

Os valores são muitos próximos levando em consideração as variações que ocorrem ao longo do ensaio e a dificuldade de moldagem do anel devido a interferência das fibras de 24 mm na trabalhabilidade, não foi possível prever um ganho mais preciso em relação ao traço CAARF<sub>24</sub> – 24 mm e nem identificar visualmente o surgimento de fissuras ou microfissuras.

O comprimento da fibra e a dificuldade que ocorre no lançamento do CAA e da argamassa devido à influência na trabalhabilidade nos traços com adição de fibras, pode ocasionar um efeito de concentração de fibras aglomeradas em pontos aleatórios causando assim uma igualdade nos resultados da deformação do anel e na idade da precisão do surgimento de fissuras.

Para classificar as correlações das variáveis e analisar as maiores relações foi realizado a matriz de correlação do coeficiente de PEARSON. A Tabela 45 apresenta os resultados da matriz de correlação.

**Tabela 45:** Matriz de correlação entre os ensaios dos anéis – CAA.

		comprimento de fibras	adição de fibras (%)	Idade média do surgimento da fissura - dias		Retardo do surgimento de fissuras - dias		Deformação do anel ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	
				reduzido	ASTM	reduzido	ASTM	reduzido	ASTM
	comprimento de fibras	1,00							
	adição de fibras (%)	0,24	1,00						
Idade média do surgimento da fissura - dias	Reduzido	0,91	0,55	1,00					
	ASTM	0,97	0,43	0,94	1,00				
Retardo do surgimento de fissuras - dias	Reduzido	0,91	0,55	1,00	0,94	1,00			
	ASTM	0,97	0,43	0,94	1,00	0,94	1,00		
Deformação do anel ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Reduzido	-0,96	-0,45	-0,98	-0,98	-0,98	-0,98	1,00	
	ASTM	-0,90	-0,48	-0,97	-0,93	-0,97	-0,93	0,97	1,00

**Fonte:** Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados é possível estabelecer uma correlação muito forte (0,90 a 1,00) entre as variáveis da idade média do surgimento da fissura (dias), retardo do surgimento de fissuras (dias), deformação do anel e a variação do tamanho do anel.

O comprimento da fibra apresenta uma correlação muito forte com as variáveis, entretanto, em relação a idade de surgimento das fissuras o comprimento da fibra apresenta maior influência, fato esse que está relacionado com o direcionamento das fibras dentro do anel, formando um alinhamento entre as fibras, atuando em todas as direções de expansão e retração do ensaio do anel.

#### 4.4.2. Resultado dos ensaios com anel – Argamassa

##### 4.4.2.1. Resultados dos ensaios do anel com restrição ARG – ANEL ASTM C1581:2016

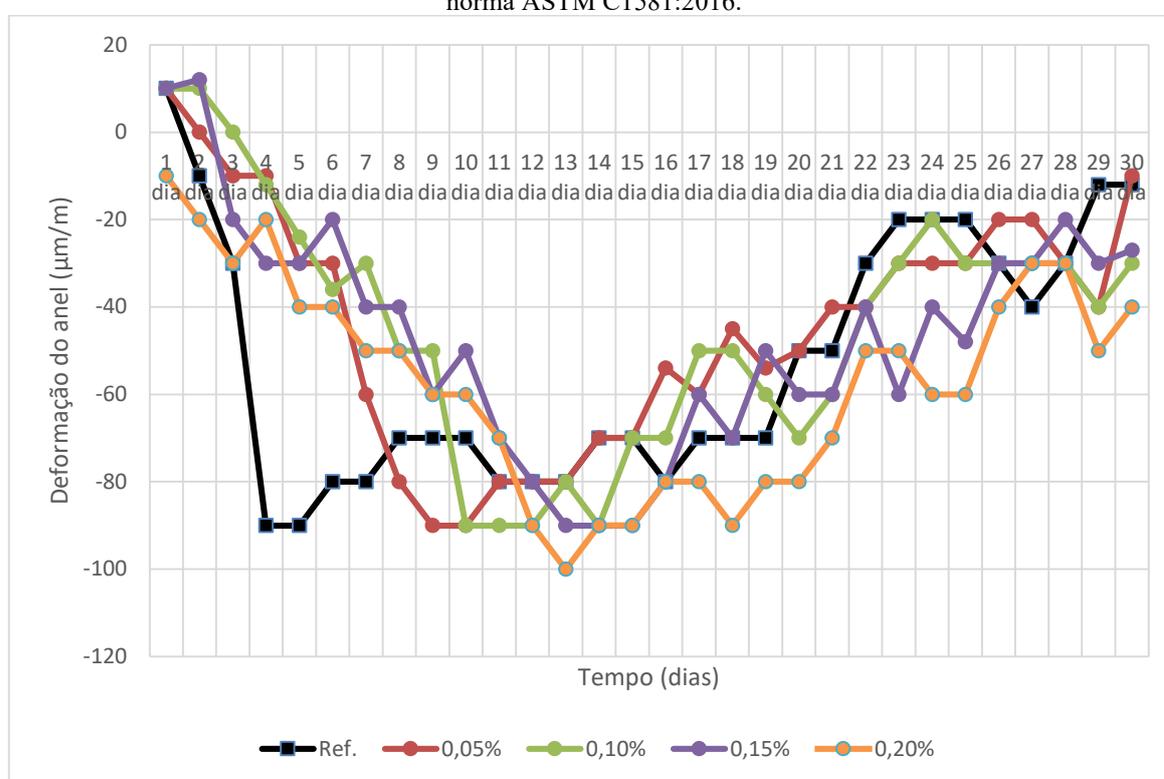
Segundo os resultados dos ensaios dos anéis da ARGRF<sub>0</sub> das demais ARGRF verificou-se primeiramente que ocorre uma expansão entre os 3 primeiros dias do ensaio. A partir do 4º dia de ensaio inicia-se o processo de compressão no anel interno. Nota-se um

padrão na deformação do anel entre os 12º e 14º dias.

Entre os 19º e 22º dias do ensaio é possível verificar uma variação nos resultados devido as características individuais de cada traço.

Para facilitar a interpretação dos dados e analisar com mais precisão os resultados, foram elaborados gráficos separados com comprimento de fibras e teor de adição. A Figura 71 mostra os resultados do traço ARGRF<sub>6</sub> – 6 mm comparando com o traço ARGRF<sub>0</sub>.

**Figura 71.** Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF<sub>6</sub> – 6mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.



Fonte: Elaborado pelo autor

Primeiramente em relação ao traço ARGRF<sub>0</sub> foi possível verificar uma expansão no primeiro dia de ensaio, depois nota-se uma queda brusca logo após ao 3º dia de ensaio, levando assim a estabelecer uma idade média de fissura entre o 4º e 5º dia. Esta situação pode estar vinculada ao processo de evaporação nas argamassas que ocorrem em maior velocidade quando comparado com o concreto. A largura média das fissuras variou entre 0,4 a 0,5 mm.

Em relação ao traço ARGRF<sub>6</sub> – 6mm com a adição de 0,05% e 0,10% a idade média de fissura ocorreu entre o 9º e 10º dia após o início dos ensaios. Nota-se também que houve uma expansão entre o 1º e 2º dia seguindo do processo de retração que iniciou no 3º do ensaio. Entretanto, a variação entre expansão e retração nos traços com adição se apresenta de

uma forma mais gradual, diferente da observada no  $ARGRF_0$  que apresenta uma queda brusca.

A idade de fissura das adições 0,15% e 0,20% segundo os resultados podem ser observadas entre o 13º e 15º dia do ensaio, retardando o surgimento de fissuras em média 10 dias quando comparado com o traço  $ARGRF_0$ .

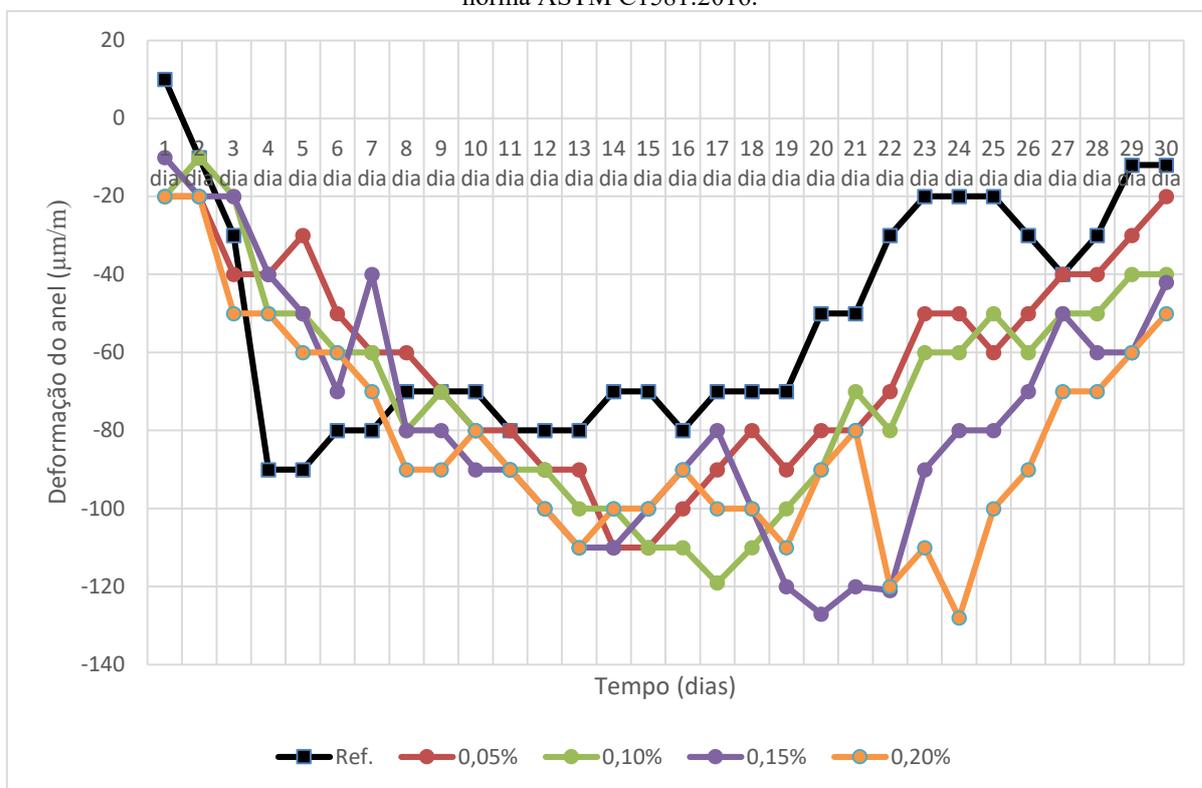
Segundo os resultados apresentados na Figura 72, em relação ao traço  $ARGRF_{12}$  – 12 mm, as adições de 0,05% e 0,10% apresentaram uma idade média de fissuração entre 14º e 17º dia de ensaio, sendo a adição 0,05% variando entre o 14º e 15º dia, mantendo uma deformação do anel variando entre -100 e -110  $\mu\text{m/m}$ .

Para as adições com 0,15% a idade média de fissura ocorreu entre o 19º e 20º dia com uma deformação média de -120  $\mu\text{m/m}$ . Ressalta-se que no período entre 13º e 14º houve uma variação entre a retração e a expansão, e logo depois uma outra oscilação entre 18º e 19º. Fato esse que pode ser devido a pequenas variações nas leituras dos extensômetros.

No que diz respeito ao traço com adição de 0,20% a idade média de fissuração se deu entre o 22º e 23º dia do ensaio com uma variação da deformação entre -110 e -128  $\mu\text{m/m}$ .

Em alguns pontos foi possível observar a largura das fissuras que apresentaram em média 0,2 a 0,3 mm.

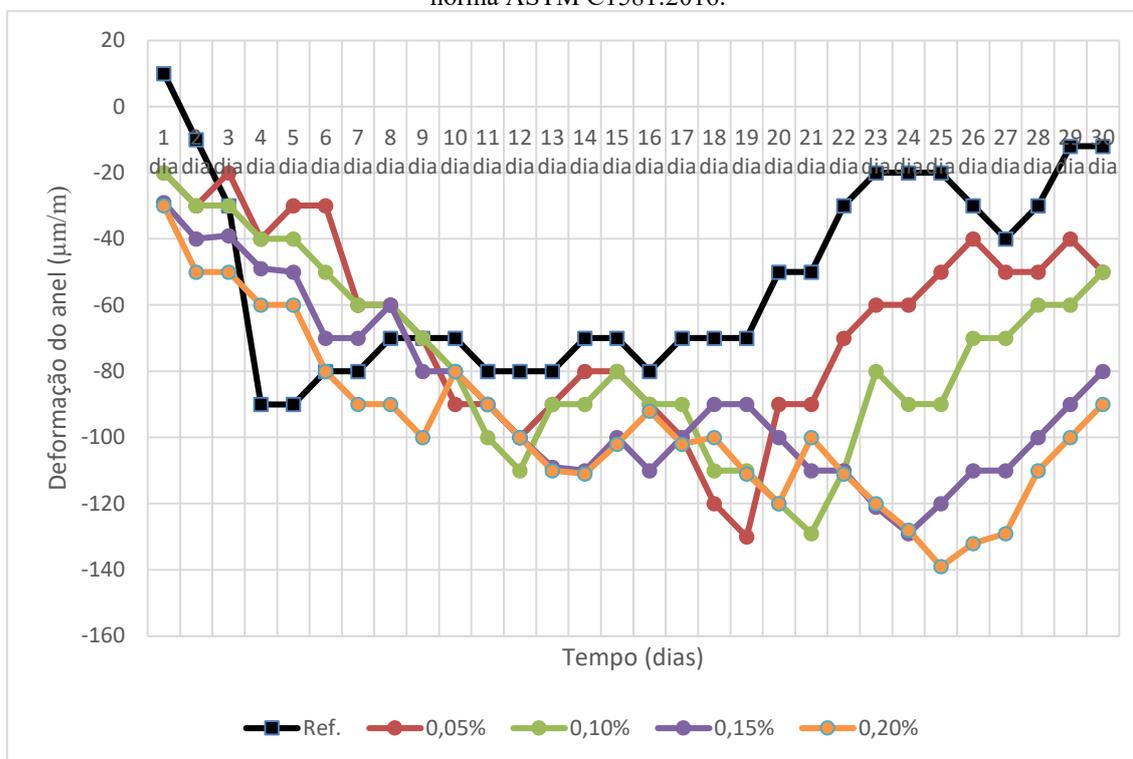
**Figura 72.** Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF<sub>12</sub> – 12mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.



Fonte: Elaborado pelo autor

No caso do traço ARGRF<sub>24</sub> – 24mm os resultados podem ser verificados na Figura 73, em relação a idade média de fissura a variação ocorreu entre o intervalo dos dias 24 e 25, e em relação a deformação média o traço apresentou uma variação entre -120 e -140 µm/m.

**Figura 73.** Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF<sub>24</sub> – 24mm segundo os critérios estabelecidos pela norma ASTM C1581:2016.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a adição 0,05% a idade média de fissura ocorreu entre o 18º e 19º dia de ensaio com uma deformação média variando entre -120 e -130 µm/m. A adição de 0,10% a idade média da fissura ocorreu entre o 20º e 21º logo após o início dos ensaios apresentando uma deformação que variou entre -120 e -130 µm/m. E no que diz respeito as adições de 0,15% e 0,20% a idade média da fissura ocorreu entre 24º e 25º dia, com uma deformação com variação entre -130 e -140 µm/m.

Não foi possível fazer a identificação visual do surgimento das fissuras, tendo em vista que não houve uma largura significativa ou que se possibilitasse a visualização a olho “nu”.

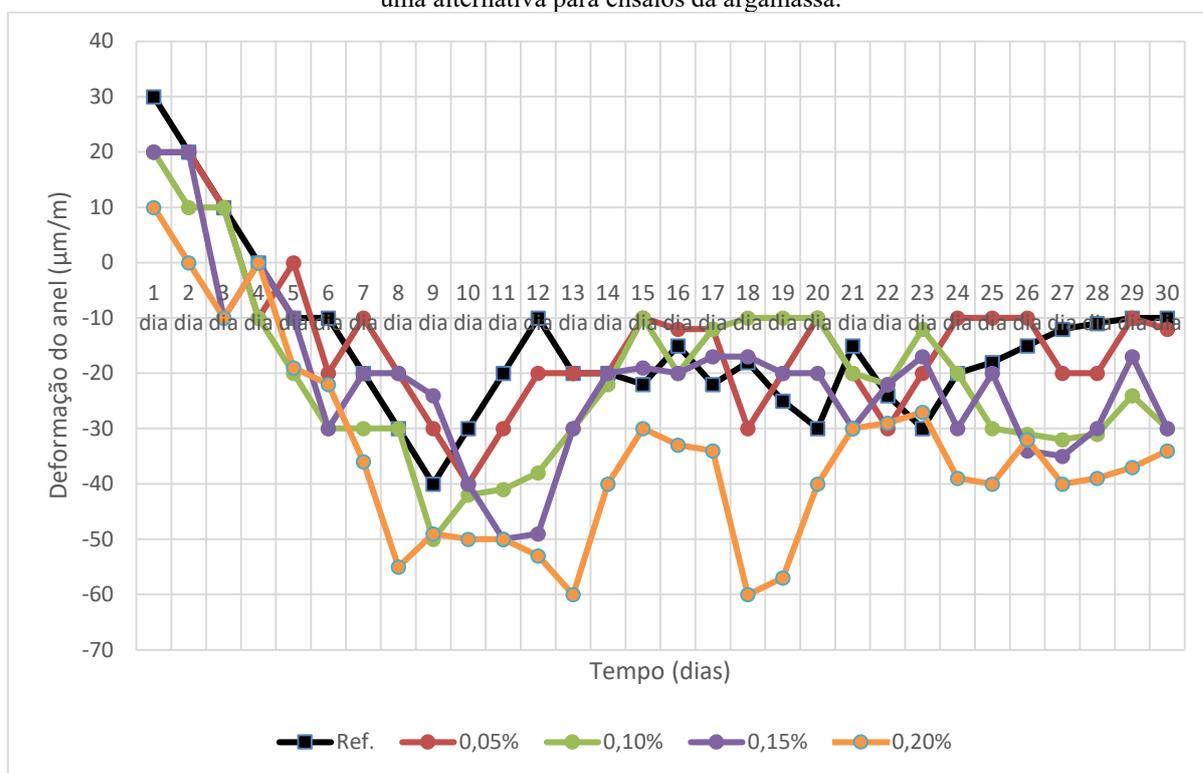
#### 4.4.2.2. Resultados dos ensaios do anel com restrição ARG – ANEL REDUZIDO (PROPOSTA DO AUTOR)

Os resultados dos anéis com redução dos traços das ARG com adições individualizados e comparados com o ARGRF<sub>0</sub> (anel reduzido) podem ser verificados a partir da Figura 74.

Em relação ao traço de ARGRF<sub>0</sub> é possível verificar uma variação brusca entre a relação expansão e retração, visualmente apresentada entre o 1º e 8º, ponto esse, onde se apresenta a idade média da fissura, ocorrendo entre o 8º e 9º dia. Quando comparado com o traço ARGRF<sub>0</sub> (ASTM) apresentou uma diferença de 4,5 dias. As fissuras foram visíveis variando entre 0,4 e 0,5 mm de largura.

No caso dos traços ARGF<sub>6</sub> – 6mm (anel reduzido) a idade média de fissuras ocorreu entre o 8º e 13º dia do ensaio, com uma deformação variando entre 20 e -60  $\mu\text{m/m}$ .

**Figura 74.** Gráfico da deformação x idade de fissura ARGF<sub>6</sub> – 6mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios da argamassa.



Fonte: Elaborado pelo autor

Para os traços com adição de 0,05% a idade média da fissura ocorreu entre 9º e 10º dia do ensaio, com uma deformação média variando entre -30 e -40  $\mu\text{m/m}$ . A adição de 0,10% apresentou uma deformação do anel variando entre -40 e -50  $\mu\text{m/m}$ , porém manteve a mesma idade média de fissura da adição de 0,05%.

No caso das adições 0,15% e 0,20% não houve diferença na idade média das fissuras, ou seja, ocorreram entre o 11º e 13º dia do ensaio, a variação apresentada é insignificante. As deformações também não apresentaram diferenças significativas, variando

entre -50 e -60  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

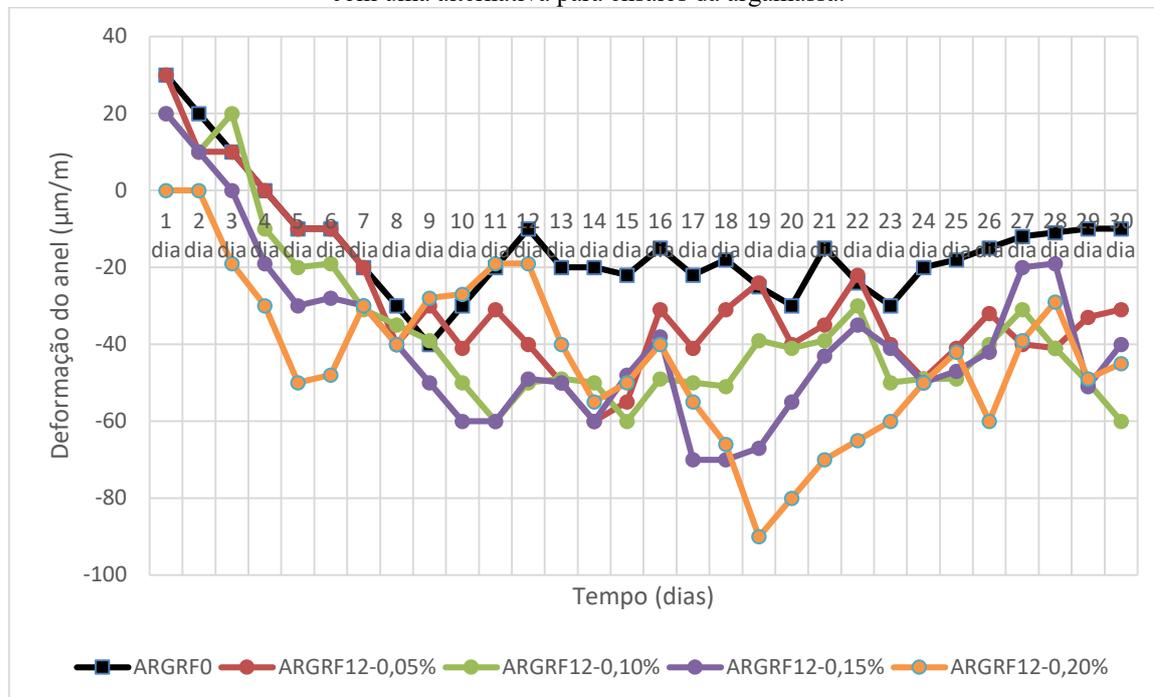
Entretanto, vale ressaltar que no caso da adição de 0,20% destaca-se uma variação que ocorre entre o 11º e 18º do ensaio, ocorrem dois picos com uma deformação de -60  $\mu\text{m}/\text{m}$ , sendo entre o 12º e 13º e entre 18º e 19º. Fato esse que pode ser explicado devido a variações de temperatura e leitura dos extensômetros. As fissuras foram visíveis e apresentaram uma largura média de 0,2 a 0,3 mm.

Segundo os resultados do traço ARGRF<sub>12</sub> – 12mm (anel reduzido), que pode ser verificado na Figura 75, a adição com 0,05% apresentou uma idade média de fissura entre o 13º e 14º dia do ensaio com uma deformação variando entre -50 e -60  $\mu\text{m}/\text{m}$ , ou seja, quando comparado com o ARGRF<sub>0</sub> (anel reduzido) apresentou uma diferença média de 4,5 dias para surgimento da fissura.

As adições de 0,10% apresentaram resultados similares com os traços de adições de 0,05%, ou seja, apresentaram a mesma deformação do anel, e uma idade média de fissuras entre o 14º e 15º dia após o ensaio. Para as adições com 0,15% verificou-se uma deformação média de -70  $\mu\text{m}/\text{m}$  com uma idade média de fissura ocorrendo entre o 17º e 18º.

Em relação ao traço com adição de 0,20% a idade média de fissura ocorreu entre o 19º e 20º, ressalta-se que houve uma queda brusca da deformação a partir do 17º até 20º, onde ocorre o pico de deformação variando entre -60 e -90  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Para visualização das fissuras se fez necessário a utilização de lentes de aumento tendo em vista que a largura das fissuras variaram de 0,1 a 0,2 mm.

**Figura 75.** Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF<sub>12</sub>– 12mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios da argamassa.

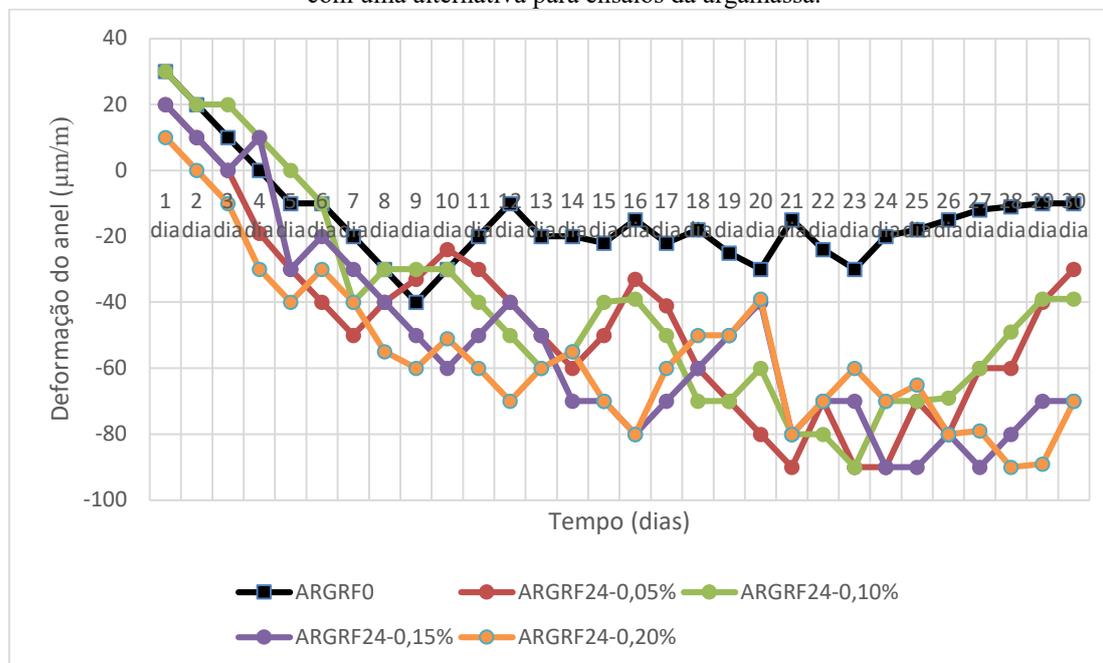


Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao traço ARGRF<sub>24</sub>– 24mm (anel reduzido) os resultados são apresentados na Figura 76, os traços com adição 0,05% e 0,10% apresentaram uma idade média de fissuras entre o 22º e 23º, retardando o surgimento das fissuras em média de 12 dias quando comparado com ARGRF<sub>0</sub> (anel reduzido).

Os traços com adição 0,15% apresentaram uma idade média de fissura entre o 24º e 25º dia, com uma deformação do anel média de -90 µm/m. Para os traços com adição de 0,20% não houve variação em relação a deformação do anel, entretanto a idade média de fissura ocorreu entre o 28º e 29º dia após o início do ensaio. Não houve identificação das fissuras visualmente.

**Figura 76.** Gráfico da deformação x idade de fissura ARGRF<sub>24</sub>- 24mm segundo a proposta da redução do anel com uma alternativa para ensaios da argamassa.



Fonte: Elaborado pelo autor

A pesquisa apresenta por Monte, Barros e Figueiredo (2018) teve como objetivo analisar a retração de argamassas de reboco produzidas com cal e aditivos incorporadores de ar com adição de fibras de polipropileno no combate a redução das fissuras nas primeiras idades. Foram realizados traços com adições de 0,10, 0,20 e 0,30% de fibras em relação ao volume da argamassa de reboco. Os traços de referência apresentaram uma idade média de fissura no 4º dia de ensaio. Ainda segundo os autores os traços com adição de fibras de polipropileno apresentaram uma idade média de surgimento de fissuras no 7º dia de ensaio para os traços com adição de cal, e entre o 7º e 8º dia para os traços com aditivos incorporadores de ar, independente do volume de adição de fibras de polipropileno.

A idade do surgimento de fissura apresentada nesta pesquisa para traços com adição de fibras variou entre 9,5º a 28,5º dia de ensaio. Comparando com os resultados apresentados por Monte, Borges e Figueiredo (2018) especificamente com os teores de 0,10% e 0,20% a idade de surgimento das fissuras apresentam valores similares quando comparados com os traços ARGF<sub>6</sub>.

Peres, Bassi e Silva Filho (2009) mediram a retração restringida de argamassas com adição de fibras escória de alto forno, utilizando anel de dimensões de 86 mm de

diâmetro externo, 52 mm de diâmetro interno e 45 mm de altura. As deformações encontradas para o traço de argamassa convencional variaram entre -10 e -45  $\mu$ s. Em relação ao traço com adição de fibras de escória de alto forno as deformações ocorreram entre -10 e -70  $\mu$ s. Ainda segundo os resultados encontrados pelos autores a adição de fibras de escória de alto forno apresentou um aumento no módulo de elasticidade da argamassa, contribuindo assim para o retardo no aparecimento das fissuras.

A deformação do anel para o ensaio da argamassa apresentado nesta pesquisa encontra-se com os valores similares apresentados por Peres, Bassi e Silva Filho (2009). A variação da deformação apresentado nesta ficou entre -10 e -90  $\mu$ m/m.

#### 4.4.2.3. Análise comparativa e resultados correlacionados do ensaio dos anéis de ARG

A Tabela 46 apresenta os resultados comparativos entre os anéis de ARGRF<sub>0</sub> e os traços com adição de fibras.

**Tabela 46:** Resultados comparativos entre os ensaios dos anéis – argamassa.

Fibras	Adição de Fibras	Idade média das fissuras (dias)		Retardo do surgimento da fissura (dias) em relação ao ARGRF <sub>0</sub>			
		REDUZIDO	ASTM	REDUZIDO	%	ASTM	%
ARGRF <sub>0</sub>	0	8,5	4,5	0	-	0	-
ARGRF <sub>6</sub>	0,05%	9,5	9,5	1	11,76%	5	111,11%
	0,10%	10,5	10,5	2	23,53%	6	133,33%
	0,15%	11,5	13,5	3	35,29%	9	200,00%
	0,20%	12,5	12,5	4	47,06%	8	177,78%
ARGRF <sub>12</sub>	0,05%	13,5	15,5	5	58,82%	11	244,44%
	0,10%	14,5	16,5	6	70,59%	12	266,67%
	0,15%	17,5	20,5	9	105,88%	16	355,56%
	0,20%	19,5	23	11	129,41%	18,5	411,11%
ARGRF <sub>24</sub>	0,05%	22,5	18,5	14	164,71%	14	311,11%
	0,10%	22,5	20,5	14	164,71%	16	355,56%
	0,15%	24,5	23,5	16	188,24%	19	422,22%
	0,20%	28,5	24,5	20	235,29%	20	444,44%

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em relação ao traço ARGRF<sub>0</sub> verificou-se que houve uma diferença de 4 dias para surgimento da fissura entre o anel reduzido e o anel padrão ASTM. A redução do anel proporcionou uma idade média para o surgimento da fissura no 8,5º dia do ensaio, enquanto o

anel ASTM a idade da fissura se deu no 4,5º dia após o início do ensaio.

Segundo os resultados apresentados para o traço ARGRF<sub>6</sub> – 6mm, foi possível notar que os resultados não apresentaram variações significativas entre os teores de adições e entre os anéis. A média de idade de fissuração no anel reduzido foi de aproximadamente 11 dias para o surgimento das fissuras e enquanto no anel ASTM foi de aproximadamente 11,5 dias.

O traço ARGRF<sub>12</sub> – 12mm em relação ao anel reduzido apresentou uma média de idade de fissura no 16,5º dia ensaio, e enquanto no ensaio do anel ASTM a idade média da fissura se apresentou no 18,5º, uma diferença de 2 dias aproximadamente. Outro ponto que pode ser observado está vinculado as adições de 0,05% e 0,10% que em ambos anéis, tanto em relação a idade média de fissura e a deformação os valores apresentados são muito próximo.

A maior contribuição em relação a idade média das fissuras está vinculada ao traço de ARGRF<sub>24</sub> – 24mm, no anel reduzido apresentou uma idade média de fissura no 24,5º dia e no anel ASTM foi no 21,5º dia após o início dos ensaios. Em relação aos traços com adição de 0,05% e 0,10% no anel reduzido não houve variação significativa em relação a idade média de fissuração, mantendo uma média de surgimento da fissura no 22,5º dia após o início do ensaio.

A análise das matrizes de correlações, visam por meio do coeficiente de PEARSON, estabelecer entre as variáveis estudadas a influência na idade de fissuração da argamassa. A Tabela 47 apresenta os respectivos resultados das correlações.

**Tabela 47:** Matriz de correlação entre os ensaios dos anéis – Argamassa.

		Comprimento das fibras	adição de fibras (%)	Idade média do surgimento da fissura - dias		Retardo do surgimento de fissuras - dias		Deformação do anel ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	
				reduzido	ASTM	reduzido	ASTM	reduzido	ASTM
	Comprimento das fibras	1,00							
	adição de fibras (%)	0,24	1,00						
Idade média do surgimento da fissura - dias	Reduzido	0,94	0,45	1,00					
	ASTM	0,84	0,62	0,91	1,00				
Retardo do surgimento de fissuras - dias	Reduzido	0,94	0,45	1,00	0,91	1,00			
	ASTM	0,84	0,62	0,91	1,00	0,91	1,00		
Deformação do anel ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	Reduzido	-0,89	-0,54	-0,96	-0,95	-0,96	-0,95	1,00	
	ASTM	-0,87	-0,33	-0,90	-0,91	-0,90	-0,91	0,92	1,00

**Fonte:** Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados apresentados as maiores correlações podem ser observadas entre o comprimento das fibras em relação com a idade média das fissuras e o retardo para o surgimento, variando de 0,84 (anel ASTM) a 0,94 (anel reduzido). Sendo classificados como uma forte correlação positiva, ou seja, quanto maior for o comprimento da fibra maior será a idade de fissura.

Outra forte correlação que pode ser observada é em relação a deformação do anel e a idade e o retardo para surgimento da fissura. A deformação do anel também apresenta uma correlação forte negativa com o comprimento da fibra, ou seja, quanto maior o comprimento da fibra, menor será a deformação.

#### 4.4.3. Comparação e correlações das metodologias dos ensaios de retração

A retração por secagem está diretamente vinculada a velocidade de secagem das peças de argamassas e concretos. Já as mudanças volumétricas ocorridas possibilitam o surgimento de fissuras. Velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar podem ser considerados como fatores externos responsáveis pela retração por secagem. Entre os fatores internos o teor de argamassa, uso de aditivos, módulo de finura do cimento, relação a/c acima de 0,55 e o consumo de agregados mais finos influenciam diretamente na retração por secagem e no surgimento de fissuras de argamassas e concretos (ROZIÈRE et al., 2007;

NIKNEZHAD e KAMALI-BERNARD, 2016; MONTE, BARROS e FIGUEIREDO, 2018; SAYAHI et al., 2019).

Tendo em vista que o CAA apresenta os principais fatores internos que podem influenciar e potencializar o surgimento de fissuras, como por exemplo alto teor de argamassa e consumo de aditivos, foram realizadas as análises comparativas dos resultados deste trabalho com pesquisas relacionadas aos ensaios das placas e anéis. Foram analisados também a matriz de correlações (coeficiente PEARSON) e análise da variância (ANOVA) visando entender a influência das fissuras das argamassas nas fissuras do CAA, além da influência de outras variáveis.

#### 4.4.3.1. Metodologia comparativa e correlações dos ensaios das placas do CAA e da ARG

A Tabela 48 compara os resultados dos principais trabalhos realizados sobre ensaio de placas com restrição para análise de fissuras em concreto, com os obtidos neste trabalho. Observa-se que estes valores estão próximos.

**Tabela 48.** Comparação dos resultados dos ensaios de placa de restrição encontrados por diversos pesquisadores, com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Referência	Tipo de concreto	Tipo de argamassa	Dimensão da fôrma (mm)	Tipos de adição	Adição fibras (%)	Resultados
Autor, 2020	CAA	CAA (ARG)	560x350 / 300x300 - h=50mm	Fibras de PP - 6mm/12mm/24mm	0,05;0,10; 0,15;0,20	Taxa de redução CAA: Placa <sub>350x560</sub> (47% a 98%); Placa <sub>300x300</sub> (40% a 99%); Taxa de redução ARG: Placa <sub>350x560</sub> (42% a 86%); Placa <sub>300x300</sub> (60% a 94%)
Silva, 2018	CAA	-	560x350 - h=50mm	Fibras de PP - 6mm/10mm/12mm/24mm	0,05;0,10; 0,15;0,20	taxa de redução 46% a 90%
Gupta e Biparva, 2017	convencional	-	560x350 - h=100mm	aditivos impermeabilizantes	-	taxa de redução 55% a 80%
Giroto, Barbosa e Maciel, 2014	-	CAA (ARG)	200x200 - h=10mm	adição de aditivos e adição mineral	-	área da fissuração 78 a 209 mm <sup>2</sup>
Pelisser et al., 2010	convencional	-	910x610 - h=20mm	Fibras de PP/PET/Nylon e Vidro -	0,05 e 0,10	PP - 55% a 75%; Vidro - 28% a 68%; PET 45% a 63%; Nylon 24% a 51%

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Pode-se verificar que os valores obtidos nesta pesquisa são compatíveis aos encontrados por outros pesquisadores, quanto a taxa de redução de fissuração para o CAA com fibras. Outro ponto que deve ser observado está diretamente vinculado com o tipo de fibra utilizada, os ensaios que visam analisar os processos de retração e fissuração utilizam fibras sintéticas e microfibras.

As microfibras e fibras sintéticas apresentam um módulo de elasticidade maior que do concreto nas primeiras idades, atuando assim como um reforço no combate as fissuras geradas nos processos de retração plásticas e por secagem (PELISSER et al. 2010; SALVADOR, FERNANDES e FIGUEIREDO, 2015 e SILVA 2018).

Em relação a taxa de redução das áreas de fissuras os resultados encontrados nesta pesquisa que variou entre 40 e 99% para o CAA, resultados similares apresentados segundo Pelisser et al., (2010), Gupta e Biparva (2017) e Silva (2018) em suas pesquisas.

Entretanto, não foram encontrados estudos com relação a argamassa do CAA separadamente afim de estabelecer uma correlação do nível influência no potencial de surgimento de fissuras do CAA.

De acordo com os resultados da Tabela 49 é possível verificar as principais variáveis que influenciam na área de fissuração do CAA por meio da análise do coeficiente de PEARSON.

**Tabela 49:** Matriz de correlação entre os ensaios das placas – CAA e ARG.

	área fissura CAA	área forma	largura fissura CAA	comprimento das fibras	adição	área fissuração ARG
área fissura CAA	1,00					
área forma <sup>1</sup>	0,54	1,00				
largura fissura CAA	0,86	0,42	1,00			
comprimento das fibras (mm)	-0,59	0,00	-0,59	1,00		
Adição (%)	-0,52	0,00	-0,69	0,24	1,00	
área fissuração ARG	0,96	0,70	0,83	-0,51	-0,43	1,00

**Fonte:** Elaborado pelo autor

A correlação mais forte existente foi apresentada entre a área de fissura da argamassa e área de fissuração do CAA, resultado este que já era esperado tendo em vista que

<sup>1</sup> Para os cálculos das correlações foram considerados área da placa 560x350 mm = 196000 mm<sup>2</sup>) e para as placas 300x300 mm área = 90000 mm<sup>2</sup>.

o teor de argamassa influência na retração e no processo de surgimento de fissuras. A correlação entre a área de fissura do CAA e a área de fissura da argamassa foi de 0,96, ou seja, quanto maior a fissura na argamassa, maior é a fissura no CAA.

A largura da fissura no CAA também sofre influência da área de fissuração da argamassa, de acordo com o resultado apresentado entre a largura da fissura do CAA e a área de fissuração da argamassa a correlação foi de 0,83, sendo classificada como uma correlação forte. O surgimento de microfissuras na zona de transição entre agregado graúdo e pasta de cimento, podem ocorrer ao logo do processo de evaporação da água, ocasionando tensões que facilitam a abertura das fissuras.

Fatores como área de forma, comprimento e adição das fibras apresentaram uma correlação moderada.

Por meio da regressão linear e a análise de variância (ANOVA) foi possível identificar os efeitos individuais e interativos das variáveis sobre a área de fissuração do CAA, que estão na Tabela 50.

**Tabela 50:** Resultados da análise de regressão placas de CAA e ARG – ANOVA.

Estatística de regressão	
R múltiplo	0,97
R-Quadrado	0,93
R-quadrado ajustado	0,91
Erro padrão	55,22
Observações	25

ANOVA					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação
<b>Regressão</b>	5	734784,82	146957	48,1866	3,851E-10
<b>Resíduo</b>	19	57945,145	3049,744		
<b>Total</b>	24	792729,96			

	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
<b>Interseção</b>	91,12698	76,25355	1,19505	0,24677	-68,47353	250,72750	-68,47353	250,72750
<b>área forma</b>	-0,00054	0,00069	-0,78258	0,44352	-0,00198	0,00090	-0,00198	0,00090
<b>largura da fissura CAA</b>	22,91708	98,70240	0,23218	0,81888	-183,66942	229,50357	-183,66942	229,50357
<b>comprimento das fibras</b>	-2,30241	3,07462	-0,74884	0,46312	-8,73767	4,13284	-8,73767	4,13284
<b>adição</b>	-238,65487	363,56797	-0,65642	0,51942	-999,61137	522,30164	-999,61137	522,30164
<b>área fissuras ARG</b>	0,71132	0,16014	4,44190	0,00028	0,37614	1,04649	0,37614	1,04649

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Segundo os resultados apresentados verificou-se a validação da regressão pelo valor do R-quadrado ajustado. O valor do R-quadrado ajustado foi de aproximadamente 0,91. Após as análises das variáveis que influenciam na área de fissuração do CAA, por meio do valor-P, a variável que apresentou a confiabilidade de 95% foi a área de fissuras da argamassa (valor-P =  $0,00028 \leq 0,05$ ), ou seja, a área de fissura da argamassa é a variável que mais influência na área de fissura do CAA.

#### 4.4.3.2. Metodologia comparativa e correlações dos ensaios dos anéis do CAA e da ARG

A Tabela 51 apresenta os resultados das pesquisas relacionadas ao ensaio do anel com restrição comparados aos obtidos nesse trabalho, os quais são similares.

**Tabela 51.** Comparação dos resultados dos ensaios do anel restrição encontrados por diversos pesquisadores, com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Referência	Tipo de concreto	Tipo de argamassa	Dimensão do anel (mm)	Tipos de adição (método)	Adição fibras (%)	Idade média das fissuras (dias)
Autor, 2020	CAA	CAA (ARG)	(ASTM) externo = 405; interno = 330; altura = 150 mm / (reduzido) externo = 190; interno = 100, altura = 75	Fibras de PP - 6mm/12mm/24 mm	0,05;0,10;0,15;0,20	CAA - anel ASTM C1581 - 9,5° - 27° CAA - anel reduzido - 14,5° - 28,5° ARG - anel ASTM C1581 - 4,5° - 24,5° ARG - anel reduzido - 8,5° - 28,5°
Sayahi et al., 2019	CAA	-	externo = 600; interno 300mm; altura 80 mm	variação da relação a/c de 0,38, 0,45, 0,55 e 0,67	-	4° a 7°
Borges, Motta e Pinto, 2019	convencional	-	externo = 405; interno = 330; altura = 150 mm	fibras de PP e fibras vegetais	0,25 e 0,50	3,75° a 7,25°
Ehrenbring, Gil e Tutikian. (2018a)	convencional	-	externo = 405; interno = 330; altura = 150 mm	fibras de Poliéster novas e recicladas	0,25 e 0,51	10° a 21°
Monte, Barros e Figueiredo et al., 2018	-	convencional	externo = 355; interno = 305; altura = 70 mm	Fibras de PP	0,1; 0,2 e 0,3	4° a 8°
Turcyr et al., 2017	CAA	-	externo = 580; interno 220 mm; altura 70 mm	comparação com CVV	-	10° a 32,4°
Niknezhad e Kamali-Bernard, 2016	CAA	-	externo = 380; interno 310 mm; altura 140 mm	escória, cinza volante e metacaulim	-	3° a 8°
Rozière et al., 2007	-	CAA (ARG)	externo = 580; interno 220 mm; altura 70 mm	variação volume da pasta 10, 20 e 30	-	a partir do 10° dia

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Ressalta-se ainda o fato que, qualquer alteração nas principais variáveis como temperatura, taxa de evaporação, umidade relativa do ar, consumo de cimento, teor de argamassa e relação água/cimento influenciam na retração e no surgimento das fissuras, bem como a metodologia utilizada na realização dos ensaios.

Em relação aos ensaios dos anéis os resultados das correlações podem ser observados na Tabela 52. A análise da correlação avalia quais variáveis podem apresentar maior influência em relação a idade de fissura. E por meio da correlação é possível estabelecer nossos procedimentos de metodologias e fôrmas.

**Tabela 52:** Matriz de correlação entre os ensaios dos anéis – CAA e argamassa.

	idade fissura CAA	volume anel	comprimento das fibras	adição	idade fissura ARG
idade fissura CAA	1,00				
volume anel <sup>2</sup>	-0,24	1,00			
comprimento das fibras	0,91	0,00	1,00		
adição	0,47	0,00	0,24	1,00	
idade fissura ARG	0,89	-0,02	0,89	0,53	1,00

**Fonte:** Elaborado pelo autor

Em relação a idade de fissura do CAA as maiores correlações ocorreram com o comprimento das fibras (0,91), sendo uma correlação muito forte e com a idade de fissura da argamassa, uma correlação forte (0,89). Nota-se que pela matriz de correlação não é possível verificar ou validar uma correlação entre o volume do anel e a idade de fissura do CAA. Entre a idade de fissura do CAA e o volume do anel a correlação foi de 0,24 negativa, ou seja, correlação fraca, quanto menor for o volume do anel, maior será a idade de fissuração.

Para a realização de uma análise mais precisa da influência individual de cada variável na idade média de fissuração do CAA, foram realizadas as análises de regressão e análise da variância (ANOVA), como apresentado pela Tabela 53.

<sup>2</sup> Para realização dos cálculos de correlação foram considerados para o anel reduzido o volume de 3,9 litros (3,9e+6 mm<sup>3</sup>) e para o anel ASTM 6,6 litros (6,6e+6 mm<sup>3</sup>) de argamassa/CAA.

**Tabela 53:** Resultados da análise de regressão anéis CAA e argamassa – ANOVA.

Estatística de regressão								
R múltiplo	0,97							
R-Quadrado	0,94							
R-quadrado ajustado	0,92							
Erro padrão	1,26							
Observações	25							
ANOVA								
	gl	SQ	MQ	F	F de significação			
<b>Regressão</b>	4	476,21015	119,05254	75,231039	9,169E-12			
<b>Resíduo</b>	20	31,649846	1,5824923					
<b>Total</b>	24	507,86						
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	valor-P	95% inferiores	95% superiores	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
<b>Interseção</b>	15,63974	1,3370078	11,697568	2,132E-10	12,85079	18,428689	12,85079	18,428689
<b>Volume anel comprimento das fibras</b>	-0,8637344	0,1875679	4,6049151	0,0001714	-1,2549943	-0,4724746	1,2549943	0,4724746
<b>adição</b>	0,5293984	0,0846285	6,2555579	4,151E-06	0,3528665	0,7059303	0,3528665	0,7059303
<b>idade fissura</b>	20,948133	5,9056249	3,5471492	0,0020217	8,6292149	33,26705	8,6292149	33,26705
<b>ARG</b>	-0,0365959	0,1307245	0,2799465	0,7823935	-0,3092825	0,2360907	0,3092825	0,2360907

**Fonte:** Elaborado pelo autor

A regressão pode ser considerada validada uma vez que o valor de R-quadrado ajustado foi de aproximadamente 0,92. E, por meio da análise do valor-P, as variáveis que representaram um nível de confiança de 95% em relação a idade de fissuração do CAA foram: o comprimento e adição das fibras, valores abaixo de 0,05, e o volume do anel com o valor de 0,0001714, ou seja, menor que 0,05.

Por meio dos resultados obtidos as variáveis com valores-P menores que 0,05 são as que mais influenciam na idade média de fissuras do CAA.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi analisada a correlação dos ensaios de retração do CAA com a adição de microfibras de PP com variáveis de comparação, podendo-se concluir:

- no ensaio que mede a retração do CAA existe uma correlação entre a área de fissuração e a idade das fissuras;
- quanto maior a área de fissuração nas placas de CAA e da argamassa menores são as idades do surgimento das fissuras;
- a área de fissura do CAA apresenta uma correlação direta com a área de fissuração da argamassa. Quanto maior a área de fissuração da argamassa, maior é a área de fissuras do CAA;
- a adição de microfibras de PP no CAA e na argamassa são consideradas viáveis para estudos de correlação entre ensaios de retração pois contribuem diretamente na redução das áreas de fissuras e no ganho de idade de surgimento de fissuras;
- as microfibras de PP do CAA influenciam na trabalhabilidade e viscosidade do CAA, entretanto, o efeito costura das microfibras apresentaram correlação direta com a taxa de redução das larguras e das áreas de fissuras do CAA e da argamassa;
- os resultados encontrados na proposta de redução das placas e dos anéis apresentam uma correlação forte quando comparados com aqueles obtidos nos ensaios que seguiram a norma americana;
- o comprimento das fibras apresenta uma maior influência na área de fissuração e na idade do surgimento das fissuras.

Isto posto, conclui-se que a proposta de redução da dimensão da fôrma e do anel apresenta uma possível alternativa para o ensaio de retração do CAA e da argamassa, principalmente para os comprimentos de microfibras de 6 mm e 12 mm.

## 6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de ensaios de retração alterando o consumo de cimento e a relação água/cimento do CAA;
- Traços de CAA com adição de outros tipos de fibras como: poliéster, vidro e reciclada;
- Traços de CAA com adição de sílica ativa e metacaulim;
- Estudo da retração livre do CAA e da argamassa;
- Variação da temperatura, umidade relativa do ar e taxa de evaporação no momento da realização dos ensaios de retração.

## 7. 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.

ABREU, R.V.S., OLIVEIRA, H.C.P. **Concreto reforçado com fibras: aperfeiçoamento das propriedades físicas e mecânicas**. I Seminário Científico da FACIG: Sociedade, Ciência e Tecnologia, outubro, 2015.

ABUKHASHABA, M.I., MOSTAFA, M.A., ADAM, I.A. **Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust**. Alexandria Engineering Journal, V.53, pp.341–354, 2014.

ACKER, P; TORRENTI, J.M.; GUÉRINET, M. **Controle da fissuração nas primeiras idades: condição de durabilidade das obras de concreto**. In: Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Ollivier e A. Vichot (orgs). Tradução: O. Cascudo e H. Carasek. São Paulo: IBRACON, p.181-206, 2014,

ALCÂNTARA, M.A.M.; GRANIU, J.L.; PONS, G.; MOURET. **Estudo comparativo de soluções mono e bi-fibradas para casos de concreto auto-adensável e concreto vidrado**. 57º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON. Bonito, 2015.

ALFERES FILHO, R. MONTE, R., FIGUEIREDO, A.D. **Avaliação do grau de orientação de fibras de aço induzida na moldagem de elementos planos com concreto autoadensável**. Revista Matéria, v.24, n.02, 2019.

ALTOUBAT, S.; JUNAID, M.T.; LEBLOUBA, M.; BADRAN, D. **Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete**. Cement and Concrete Composites. v.79, pp. 9 -20, 2017.

AMARAL JUNIOR, J.C., SILVA, L.C.F., MORAVIA, W.G. **Análise experimental da adição de fibras poliméricas nas propriedades mecânicas do concreto**. Revista Matéria, v.22, n.01, 2017.

AMBROZEWICZ, P.H.L. **Materiais de construção: normas, especificações, aplicação e ensaios de laboratório**. São Paulo: Pini, 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO. **Estimating the Cracking Tendency of Concrete**, 334 p., 2006.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 305R-10. Guide to hot weather concreting**. Farmington Hills: USA. 2010.

\_\_\_\_\_. **ACI 308-92. Standard practice for curing concrete**. Farmington Hills: USA. 1992.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1437: Standard test method flow of hydraulic cement mortar.** 2007, 7p.

\_\_\_\_\_. **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,** 2016, 7 p.

ANGELIN, A.F.; SILVA, F.M.; GIORNO, L.S.; LINTZ, R.C.C.; GACHET BARBOSA, L.A. **Propriedades Físicas e Mecânicas do Concreto Auto Adensável Modificado com Argila Expandida e Pó de borracha.** 57º Congresso Brasileiro de Concreto. IBRACON. Bonito, 2015

ANTONIO, F.; RECENA, P.; **Retração do concreto.** Porto Alegre/RS: Editora universitária da PUCRS. 151p. 2014.

ARIF, M. A. **Avaliação da medida de tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 155p., 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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

\_\_\_\_\_. **NBR 12821. Preparação de concreto em laboratório – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável – Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-5: Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade –**

**Método do funil V.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16607: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto – Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2018.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605: Cimento portland e outros materiais em pó – Determinação de massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

AURICH, M. **Simulação computacional do comportamento do concreto nas primeiras idades.** 2008. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

BARBOSA, M.S., CARVALHO, C.M., DELFINO, R.K.R., ALVES, J.S., ANDRADE, E.F.F.O., DANTAS, M.P. **Produção de concreto de alto desempenho (CAD) com adição de pó de pedra.** Revista Interscientia. v.7, n.1, p. 200-217, jan-jun/2019.

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.

BARODAWALA, Q.I., SHAH, S.G., SHAH, S.G. **Effect of multi walled carbon nano tubes on strength and durability of self compacting concrete.** The Indian Concrete Journal, pp. 81-85, 2017.

BATTAGIN, A.F; BATTAGIN, I.L.S. **Cimento Portland.** In: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. 3ªed. G.C.Isaia (org). São Paulo: IBRACON. Volume1, p.761-792., 2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. London and New York: Modern Concrete Technology Series, 601 p. 2 ed. 2007.

BORGES, A.P.S.N.; MOTTA, L.A.C.; PINTO, E.B. **Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso em paredes estruturais**. Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

BRIFFAUT, M., BENBOUDJEMA, F., D'ALOIA, L. **Effect of fibres on early age cracking of concrete tunnel lining. Part I: Laboratory ring test**, Tunnelling and Underground Space Technology, 59 (2016) 2015 – 2020, 2016.

BULLARD, J.W., JENNINGS, H.M., LIVINGSTON, R.A., NONAT, A., SCHERER, G.W., SCHWEITZER, J.S., SCRIVENER, K.L., THOMAS, J.J. **Mechanisms of cement hydration**. Cement and Concrete Research, Oxford. v. 41, n.12, p. 1208-1223, 2011.

CÁCERES, A.R.E., GALO BARDES, I., REBMANN, M.S., MONTE, R., FIGUEIREDO, A.D. **Caracterização geométrica da macrofibras polimérica**. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. v.8, n.5, p. 644-668, 2015.

CAMPOS, R.S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas**. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias – Pontifícia Universidade Católica de Campinas. 228f. 2017.

COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BETON. **CEB-FIP Model Code 56**. 1990.

CONCRETE Q&A. **Estimating Evaporation Rates to Prevent Plastic Shrinkage Cracking**, pp 80-82, Concrete international, Março, 2007.

COSTA, A.C.S.S.; CABRAL, A.E.B. **Estudo comparativo entre o concreto autoadensável e o concreto convencional vibrado em obra vertical**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 19, n. 4, p. 289-301, out./dez. 2019.

CRISTOFOLI, T., CATRINE, G. TUTIKIAN, B.F., CHRIST, R. **Influência da adição de fibras metálicas em concreto autoadensável no estado endurecido**. V Congresso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável e Betões Especiais (HAC2018). Valência, março, 2018.

DA COSTA, F.B.P., RIGHI, D.P., GRAEFF, A.G., DA SILVA FILHO, L.C.P. **Experimental study of some durability properties of ECC with a more environmentally sustainable rice husk ash and high tenacity polypropylene fibers**, Construction and Building Materials, 203 (2019) 505 – 513, 2019.

D'AMBROSIA, M.D., LANGE, D.A., BRINKS, A.J. **Restrained Shrinkage and creep of self-consolidating concrete**. Research Gate. 2015.

DE LA CRUZ, C.J., RAMOS, G., HURTADO, W.A. **Evaluation of the shrinkage and creep of medium strength self compacting concrete**. IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering. 2017.

DIAS, R.F. **Comparação da determinação da tenacidade do concreto reforçado com fibras de aço por meio do ensaio de abertura por encunhamento e da ASTM C1609.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG. 139p., 2018.

DINIZ, J.Z.F., FERNANDES, J.F., KUPERMAN, S.C. **Retração e fluência.** In: Concreto: Ciência e Tecnologia. 1ªed. G.C.Isaia (org). São Paulo: IBRACON. Volume1, p.673-703. 2011.

EAGELTON, J. **Restrained Shrinkage Behavior of Heat-Cured, High Early Strength High-Performance Concrete (HES-HPC).** Thesis (Master of Science). Program in Civil and Environmental Engineering. State University of New Jersey. New Jersey, 2014.

EHRENBRING, H.Z.; QUIRINO, U.; TUTIKIAN, B.F. **Comparação da retração por secagem entre concretos convencionais e com adição de fibras de poliéster.** Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções - CBPAT, 2016.

EHRENBRING, H.Z.; GIL, A.M; TUTIKIAN, B.F. **Impact of the incorporation of polymeric fibers in drying shrinkage concrete.** 3rd R N raikar memorial international conference & gettu-kodur international symposium on advances in science & technology of concrete. Mumbai, India, 2018a.

EHRENBRING, H.Z.; TUTIKIAN, B.F.; QUIRINO, U. C. M.; **Comparative analysis of the retraction through the drying shrinkage of new and recycled polyester fibers.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 195-209, jul./set. 2018b.

ELATY, M.A.A.A.; GHAZY, M.F. **Fluidity evaluation of fiber reinforced-self compacting concrete based on buoyancy law.** HBRC Journal, 2017.

EFNARC. **The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.** The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2010.

FERREIRA, A.L.S. **Comparação de diferentes técnicas para detecção e tratamento de outliers na determinação de fatores de medidores.** Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de PósGraduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio, julho, 2017.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras.** Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO FILHO, D.B.; SILVA JÚNIOR, J.A. **Desvendando os mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r).** Revista Política Hoje, Vol.18, n.1, p.115-146., 2009.

FIGUEIREDO FILHO, D.B., ROCHA, E.C., SILVA JÚNIOR, J.A. PARANHOS, R., NEVES, J.A.B., SILVA, M.B. **Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de**

**Pearson: o retorno.** Leviathan Cadernos de Pesquisa Política, n.8, pp.66-95, 2014.

FRANCINETE JÚNIOR, P., SILVA, E.F., LOPES, A.N.M. **Estudo comparativo entre o emprego dos extensômetros do tipo Carlson e do tipo de temperatura auto compensável para determinação da retração autógena.** Revista Matéria, v.23, n.3, 2018.

GAMBALE, P.G. **Estudo do calor de hidratação do concreto massa e contribuição ao cálculo térmico e à previsão de fissuras de retração.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 120p., 2017.

GIROTTI, L.S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidades Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2012.

GIROTTI, L.S., BARBOSA, M.P., MACIEL, G.F. **Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. v.7, n.1, p.24-52., 2014.

GUADAGNINI, P. H.; SARAIVA, F.; ELISABETH, V. **Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força.** Lat. Am. J. Phys. Educ., v. 5, p. 753–762, 2011.

GUPTA, R.; BIPARVA, A. **As adições cristalinas impermeabilizantes afetam o comportamento da retração plástica do concreto?** Revista ALCONPAT, v.7, n.1, p.15-24., 2017.

HELENE, P; ANDRADE, T. **Cimento Portland.** In: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. 3ªed. G.C. Isaia (org). São Paulo: IBRACON, Volume1, p.970-1005. 2017.

HOFFMANN, K. **An Introduction to Measurements using Strain Gages.** Alsbach: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.

HUANG, Y., YUAN, B., XIAO, L., LIU, Y. **Studies on the wet expansion deformation of hydraulic concrete with fly ash under non-standard temperatures.** Case Studies in Construction Materials. V8, p.392-400, 2018.

ICC. INTERNACIONAL CODE CONCIL. ICC AC32. **Concrete with synthetic fibers.** 2018.

IDIART, A. E. **Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level.** Thesis (Doctoral). Department of Geotechnical Engineering and Geosciences – Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 213 p., 2009.

ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON. 1ª edição. 2v. 1902p. 2011.

JADHAV, S.H.; PAWAR, V. V.; DOKHALE, R. R. **A review report on plastic shrinkage of concrete & self compacting concrete.** International Journal of Advance Research in Science and Engineering. v.3, n.6, 2017.

KAR, S.; SANJAY, S.S. **Effect of admixtures on shrinkage properties in self compacting concrete.** International Journal of Research in Engineering and Technology. v.5, n.02, 2016.

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.

KANTRO, D. **Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste—A Miniature Slump Test.** Cement, Concrete and Aggregates. v.2, n.2, pp. 95-102, 1980.

KUMAR, B.N.N., RAO, R.V.N., KUMAR, G.B. **Development of Normal Strength and High Strength Self Curing Concrete and Self Compacting Concrete Using Sodium Polyacrylate As A Polymer.** International Journal of Scientific Research in Science and Technology (JSRST). v.3, n.3, pp.568-576, 2017.

KURDOWSKI, W. **Hydration of Clinker Phases.** In: Cement and Concrete Chemistry. Wieslaw Kurdowski (org). Editora Springer: Polônia, 368p, 2014.

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

LÖFGREN, I.; ESPING, O. **Early age cracking of self-compacting concrete.** International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. August 2006.

LONG, W-L; KHAYAT, K. H.; LEMIEUX, G.; XING, F.; WANG, W-L. **Factorial Design Approach in Proportioning Prestressed Self-Compacting Concrete.** Materials, v.8, pp. 1089-1107, 2015.

MACCAFERRI. Manual Técnico de fibras. Disponível em < <https://www.maccaferri.com/br/documentos/manual-tecnico/> > acesso em 07 abril 2017.

Manual Técnico MC-BAUCHEMIE. MC- Disponível em < [https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Manual%20MC%20para%20Indu%CC%81stria%20do%20Concreto%202016-17\\_web.pdf](https://www.mc-bauchemie.com.br/assets/Brasil/Downloads/Manual%20MC%20para%20Indu%CC%81stria%20do%20Concreto%202016-17_web.pdf) > acesso em 07 abril 2017.

MASHHADBAN, H., KUTANAEI, S.S., SAYARINEJAD, M.A. **Prediction and modeling of mechanical properties in fiber reinforced self-compacting concrete using particle swarm optimization algorithm and artificial neural network.** Construction and Building Materials. v. 119, p. 277–287, 2016.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M.; **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 1ª Edição, São Paulo, 2014.

MELO NETO, A. A. **Estudo da influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 253p. 2008.

MIRANDA, L.R.M., MORAIS, G.A.T., LIRA, V.Q., ABREU, M.M. **Avaliação da resistência à compressão e do desempenho frente à corrosão por cloretos de um concreto auto-adensável produzido com adição de biopolímero**. Conferência Nacional de Patologia e Recuperação de Estruturas (Conpar). Recife, agosto 2017.

MONTE, R.; BARROS, M.M.S.B., FIGUEIREDO, A.D. **Evaluation of early age cracking in rendering mortars with polypropylene fibers**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 21-32, abr./jun. 2018.

MENU, B.; Jolin, M.; Bissonnette, B.; Ginouse, N. **Evaluation of early age shrinkage cracking tendency of Concrete**. Leadership in Sustainable Infrastructure, Leadership en Infrastructures Durables. Vancouver, Canada, May 31 – June 3, 2017.

NAM, J.; KIM, G.; YOO, J.; CHOE, G.; KIM, H.; CHOI, H.; KIM, Y. **Effectiveness of Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties and Shrinkage Cracking of Recycled Fine Aggregate**. Concrete, Materials, v.9, p.131, 2016.

NASSIF, H.; AKTAS, K.; NAJM, H. **Cracking Potential in High-Performance concrete (HPC) under restrained conditions**. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna, Miedzydroje, Awarie Budowlane, maja 2011.

NEVES, R.D., BRANCO, F., BRITO, J. **Avaliação da influência da largura das fissuras na evolução da frente de carbonatação**. Encontro Nacional Betão Estrutural – BE2010. Lisboa: novembro de 2010.

NEVILLE, A.M., BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 5ª Ed. Porto Alegre: Bookman, 440p., 2016.

NIKNEZHAD, D., KAMALI-BERNARD, S. **Restrained shrinkage and cracking tendency of Self-Compacting Concrete incorporating supplementary cementitious materials (SCMs)**. 34èmes Rencontres de l’AUGC. Liège, Belgium. May.2016.

NONAT, A. **Durabilidade do concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. 1ªed. Jean-Pierre Olliver e Angélique Vichot. São Paulo: IBRACON, Capítulo 2, p. 139-180. 2014.

NORDTEST METHOD. NT BUILD 433. **Concrete: cracking tendency – exposure to drying during the first 24 hours**. Nordtest, proj.984-91.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland**. Boletim Técnico. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2007.

OLAFUSI, O.S, ADEWUYI, A.P., OTUNLA, A.I., BABALOLA, A.O. **Evaluation of Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete.** Open Journal of Civil Engineering. v.5, p.1-7. 2015.

ONGHERO, L. **Combate à retração e fissuração em concretos de alto desempenho reforçados com microfibras de vidro.** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

PELISSER, 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.

PERES, M.V.N.N., BASSI, M.R., SILVA FILHO, L.C.P. **Análise do comportamento de um compósito reforçado com fibra de escória de alto forno reciclada através de um ensaio de retração restringida.** ANAIS DO 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, outubro, 2009.

PILLAR, N.M.P. **Propriedades mecânicas nas primeiras idades como preditoras das tensões induzidas e fissuração de concreto projetado reforçado com fibras.** Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

PONS, G.; TORRENTI, J.M. **Durabilidade do concreto – Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente.** 1ªed. Jean-Pierre Olliver e Angélique Vichot. São Paulo: IBRACON, p. 139-180. 2014.

RAUCCI, J.S., CECEL, R.T., ROMANO, R.C.O., PILEGGI, R.G., JOHN, V.M. **Efeito do método de mistura sobre o espalhamento mini-slump de pastas de cimento Portland.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. V.11, n.02, pp. 410-431. 2018.

REIS, B.C.M., PINTO, R.L.M., SOARES, C.L. **Aplicação da análise estatística via teste de Tukey e análise de variância para a avaliação dos parâmetros de qualidade de corte em um processo de fabricação.** XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP). João Pessoa/SP, Brasil, outubro 2016.

ROZIÈRE, E., GRANGER, S., TURCRY, P., LOUKILI, A. **Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete.** Cement and Concrete Composites: Elsevier, ed. 29 (8), pp.626-636, 2007.

ROCHA, I. **Corrosão em estruturas de concreto armado.** Revista Especialize Online IPOG, v. 1, n. 10, 26p., 2015.

SALVADOR, R.P.; FIGUEIREDO, A.D.; **Análise comparativa de comportamento mecânico de concreto reforçado com macrofibra polimérica e com fibra de aço.** Revista Matéria, v. 18, n. 2, pp. 1273 – 1285, 2013.

SALVADOR, R.P., FERNANDES, J.F., FIGUEIREDO, A. D. **Avaliação do concreto reforçado com baixos teores de fibras para fins estruturais segundo a norma EN 14651-200**, revista Matéria, v.20, n.4, pp. 961 – 974, 2015.

SAYAHI, F.; EMBORG, M., HEDLUND, H., CWIRZEN, A. **Plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete: influence of capilar pressure and dormant period**. Nordic Concrete Reserarch – v.60, n.1, pp.67-88, 2019.

SHEN, D., WEN, C., KANG, J., SHI, H., XU, Z. Early-age stress relaxation and cracking potential of High-strength concrete reinforced with Barchip fiber, Construction and Building Materials, 258 (2020) 119538, 2020.

SILVA, L.M.B. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 393f, 2016.

SILVA, M.G., BATTAGIN, A.F., GOMES, V. **Cimentos Portland com adições minerais**. In: Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. G.C. Isaia (org). 3<sup>a</sup>.ed. São Paulo: IBRACON, 2017. Volume1, p.793-841. 2017.

SILVA, L. **Análise da influência das microfibras de polipropileno no controle da retração hidráulica no concreto autoadensável**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia civil. 2018.

SILVA, J.B.L.P., JACINTHO, A.E.P.G.A., FORTI, N.C.S., PIMENTEL, L.L., BRANQUINHO, O.C. **Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade cultural**. Revista Matéria. V.24, n.04, 2019.

SILVA, I.S., KOLLING, E.A.S.A., DANTAS, E. R., FERREIRA, D.A.L., DE OLIVEIRA, L.S.Z. **Probabilidade de alta resistência à compressão de diferentes dosagens de gesso no concreto**. Ciências exatas e tecnológicas, Aracaju, v. 6, n.1, p. 117-126, março 2020.

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

SOUZA, R. B. **Estudo da retração em fibrocimento reforçado com fibra polimérica**. Tese (doutorado). Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação da Escola Politécnica. São Paulo, 2014.

SOUZA, P.S.L. DAL MOLIN, D.C.C., PICANÇO, M.S., MACÊDO, A.N., VASCONCELOS, A.L.R., SOUZA, J.V.B. **Avaliação do módulo de elasticidade em concreto com metacaulim de alta reatividade, proveniente de rejeito industrial**. Revista Matéria. V.20, n<sup>o</sup>4, p.982-991, 2015.

SOUZA, A.R. **Retração em concreto autoadensável: contribuição de produtos mitigadores**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco/PR. 2016.

SPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete – Effects of fine aggregate and limestone filler**, CHALMERS, Civil and Environmental Engineering, Department of Civil and Environmental Engineering Building Technology CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden 2007.

STANTON, J. M. **Galton, Pearson, and the peas: A brief history of linear regression for statistics instructors**. Journal of Statistical Education, 9,3, 2001.

Disponível em: <<http://www.amstat.org/publications/JSE/v9n3/stanton.html>>, acessado em: 07 de março 2019.

TAYLOR, J. R. **Introdução à Análise de Erros: O Estudo de Incertezas em Medições Físicas**. University of Colorado: Bookman, 329 ISBN 8540701367, 2012.

TURCRY, A.L.; HAIDAR, K.; PIJAUDIER-CABOT, G.; BELARDI, A. **Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling**. Journal of Materials in Civil Engineering, American Society of Civil Engineers, 2006, 18 (1), pp.46-54. 2017.

TUTIKIAN, B.F., DAL MOLIN, D.C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: Pini, 140p. 2015.

VIEIRA, S.P. **Propriedades do concreto autoadensável com diferentes tipos de adições**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília/DF, 126 p. 2017.

WEST, M., DARWIN, D., BROWNING, J. **Effect of materials and curing period on shrinkage of concrete**. A report on research sponsored by Construction os crack-free bridge decks transportation pooled-fund study Project n° TPF-05 (051). Structural engineering and engineering materials SM report n° 98. The University of Kansar Center for Research. Kansas, January, 2010.

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, P.707-713., 2007.

YANG, Y., MA, L., HUANG, J., GU, C., XU, Z., LIU, J., NI, T. **Evaluation of the Thermal and Shrinkage Stresses in restrained high-performance concrete**. Materials, V.12, N. 3680, 2019.

YEHIA, S., DOUBA, A., ABDULLAHI, O., FARRAG, S. **Mechanical and durability evaluation of fiber-reinforced self-compacting concrete**. Construction and Building Materials, V.121, p. 120–133 2016

YOUSEFIEH, N., JOSHAGHANI, A., HAJIBANDEH, E., SHEKARCHI, M. **Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete**. Construction and Building Materials, 148 (2017) 833-845, 2017.

ZHOU, X.; ASCE, M.; DONG, W., OLADIRAN, O. **Experimental and Numerical Assessment of Restrained Shrinkage Cracking of Concrete Using Elliptical Ring Specimens.** *J. Mater. Civ. Eng.*, 26(11), 2014.