

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL**

TOBIAS JUN SHIMOSAKA

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS DE
AÇO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS**

PATO BRANCO

2017

TOBIAS JUN SHIMOSAKA

**INFLUÊNCIA DO TEOR DE DIFERENTES TIPOS DE FIBRAS DE
AÇO EM CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Mário Arlindo Paz Irrigaray.

PATO BRANCO

2017

S556i Shimosaka, Tobias Jun.

Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos auto adensáveis / Tobias Jun Shimosaka . -- 2016.
121 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Mário Arlindo Paz Irrigaray
Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Pato Branco, PR, 2016.
Bibliografia: f. 98 – 103.

1. Concreto - Aditivos. 2. Concreto - Resistência. 3. Concreto armado.
4. Concreto - Fibras. I. Irrigaray, Mário Arlindo Paz, orient.
II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 624

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO Nº 03

Título da Dissertação

“Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis”,

Autor

Tobias Jun Shimosaka

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas do dia 11 de novembro de 2016, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL– Linha de pesquisa em materiais e componentes da construção – no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. A autora foi arguida pela Banca Examinadora abaixo assinada, a qual, após deliberação, considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Mario Arlindo Paz Irrigaray
UTFPR/PB
Presidente

Profa. Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada
Unioeste/Cascavel
Examinadora

Profa. Dra. Marina Rocha
UTFPR/PB
Examinadora

Visto da Coordenação

Prof. Dra. Caroline Angulski da Luz
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil- PPGEC

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, Edson e Yole,
e minha amada esposa Tania, por todo amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela imensa misericórdia e por seu amor incondicional.

Aos meus pais Edson Hitomi Shimosaka e Yole Aparecida Fabrício Shimosaka, por todo amor, carinho e cuidado comigo. Por terem priorizado em suas vidas, que eu e meus irmãos tivemos uma boa educação, não medindo esforços para a mesma.

A minha esposa Tania Mara Bonadiman Shimosaka pela sua grande compreensão em toda a minha trajetória acadêmica, sempre proferindo palavras de incentivo, ânimo e amor.

Ao professor Dr. Mario Arlindo Paz Irrigaray por toda orientação, companheirismo, conhecimento transmitido e pela sua compreensão durante a realização deste trabalho.

As professoras Dra. Marina Rocha e Dra. Giovanna Patrícia Gava Oyamada por terem feito parte da banca avaliadora e pelas contribuições feitas ao trabalho.

Ao professor Dr. Gustavo Lacerda por toda a atenção dada e por todo auxílio, sempre se mostrando disponível.

Aos colegas de mestrado Andrea Resende, Maurício Pegoraro e Bruna Gracioli pela amizade durante esse tempo, e por todo auxílio para finalização de todo esse processo.

Ao técnico de laboratório Vitor Baldin, pelo auxílio na elaboração dos dispositivos de ensaios.

Agradeço a Capes, ao PPGEC e ao CNPQ.

A todos que de alguma forma contribuíram, quero deixar meus sinceros agradecimentos.

*“ Porque onde está o teu tesouro, lá
também está teu coração. ”*

Mateus 6:21.

RESUMO

SHIMOSAKA, Tobias Jun. Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis. 2016. 121 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

O emprego de concreto em estruturas é bastante elevado em todo o mundo. Entretanto, o concreto convencional pode apresentar problemas relacionados com a durabilidade da estrutura, como o caso dos vazios de concretagem. O concreto autoadensável (CAA), vem se caracterizando como uma evolução do concreto convencional, pois apresenta vantagens como capacidade de preencher espaços, devido a auto adensabilidade, elimina falhas de concretagem e possibilita estruturas mais duráveis. Apesar dessas melhoras no estado plástico, no estado endurecido, as características do CAA se assemelham muito com as de um concreto convencional, ou seja, boa resistência à compressão, porém baixa resistência à tração e à fadiga. Assim, como forma de mitigar essas limitações, tem-se como evolução o emprego de concretos reforçados com fibras (CRF), os quais pela interferência da fibra atuando como costura nas fissuras presentes, resultam em compósitos, com melhor desempenho frente a esses esforços. Dentro desse contexto, a presente pesquisa analisou o desempenho de concretos autoadensáveis, com incorporação de fibras de aço, para que como resultado, fosse possível manter todas as melhoras ganhas no estado endurecido em suas propriedades mecânicas, sem que fossem perdidas as características de auto adensabilidade do CAA. Dessa forma, foram produzidas misturas, com diferentes tipos de fibras de aço (ancorada, corrugada e reta), com diferentes teores para cada tipo (0,4%, 0,8%, 1,2% e 1,5% em volume) e uma mistura de controle (sem adição de fibras), para então poder avaliar o comportamento do CAA quando incorporados diferentes tipos de fibras, com diferentes teores. A avaliação desse comportamento, se deu tanto no estado plástico do concreto, quanto no estado endurecido. Para as características no estado plástico, foram realizados os ensaios de espalhamento, t_{500} e Anel J. Para as propriedades no estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade. Além disso, buscou-se associar a resistência à fadiga do concreto, através de um ensaio não normatizado. Objetivando analisar a zona de transição, realizou-se o ensaio de microscopia eletrônica de varredura. Para analisar os resultados, foi necessário o emprego de tratamento estatístico, que avaliou a significância dos resultados. Os resultados mostram que foi possível manter a característica de auto adensabilidade do CAA para todos os teores de fibras empregados, e ainda obter ganhos, menos expressivos para resistência à compressão e de módulo de elasticidade, porém, resultados satisfatórios para resistência à tração e fadiga.

Palavras chave: Concreto autoadensável, fibras de aço, concreto autoadensável reforçado com fibras, propriedades estado plástico, propriedades estado endurecido.

ABSTRACT

The use of concrete structures is fairly high throughout the world. However, conventional concrete can present problems related to the durability of the structure, as in the case of concrete voids. The concrete self compacting concrete (CAA), has been characterized as an evolution of conventional concrete, for advantages like ability to fill spaces through self adensabilidade eliminates concreting failures and enables more durable structures. Despite these improvements in the plastic state, in the hardened state, CAA characteristics closely resembling those of a conventional concrete, i.e., good compressive strength but low tensile strength and fatigue. Thus, in order to mitigate these limitations, we have to progress the use of reinforced concrete with fibers (CRF), which by the interference of the fiber acting as sewing in these cracks, result in composites with better performance against these efforts. In this context, the present study examined the self compacting concrete performance with the incorporation of steel fibers, so as a result, it was possible to keep all the improvements gained in the hardened state in their mechanical properties, without the self characteristics were lost adensabilidade CAA Thus, blends were produced with different types of steel fibers (anchored, and corrugated line), with different levels for each type (0.4%, 0.8%, 1.2% and 1.5% by volume) and a mixture control (without fibers) and then to assess the CAA behavior when incorporated different types of fibers with different contents. The evaluation of this behavior occurred both in the plastic concrete state, as in the hardened state. For the characteristics in the plastic state, the scattering assays were performed, t500 and J. ring for the properties in the hardened state were performed resistance tests compressive, tensile strength by diametrical compression modulus. Furthermore, it sought to associate the fatigue strength of concrete, through a non-standardized assay. Aiming to analyze the transition zone, there was the scanning electron microscopy test. To analyze the results, employment was necessary statistical analysis, which evaluated the significance of the results. The results show that it was possible to maintain the characteristic of self adensabilidade CAA for all levels of employees fibers, and still obtain gains less significant compressive strength and modulus of elasticity, however, satisfactory results in tensile strength and fatigue.

Keywords: Self-compacting concrete, steel fiber, self-compacting concrete reinforced with fibers, plastic proprieties, hardened proprieties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 - Falha de concretagem (“bicheiras”)	15
Figura 02 - Modelos reológicos	23
Figura 03 – Classificação e geometria das fibras de aço.....	35
Figura 04 – Concentração de tensão para concreto sem (esquerda) e com (direita) fibras.....	36
Figura 05 – Possíveis distribuições de tensão	37
Figura 06 – A – Concreto sem compatibilidade entre as fibras; B – Com compatibilidade	38
Figura 07 – Comportamento volume de fibras.....	38
Figura 08 – Aglomerado de fibras de aço mal misturadas ao concreto.....	40
Figura 09 – Curvas para concretos com $f_{ck}=20\text{MPa}$ com diferentes teores de fibras	44
Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	48
Figura 11 – Determinação do material pulverulento do agregado miúdo	49
Figura 12 – Determinação da massa específica aparente da brita	51
Figura 13 – Teor de vazios e peso específico de cada mistura.....	57
Figura 14 – Slump flow do concreto de controle	58
Figura 15 – Vista em planta do posicionamento do molde	61
Figura 16 – Anel J	62
Figura 17 – Vista em planta do posicionamento do molde e do Anel J	63
Figura 18 – Disposição do corpo de prova para ensaio de compressão diametral	64
Figura 19 – Ensaio de módulo de elasticidade	65
Figura 20 – Ciclos de carga e descarga para determinação do módulo de elasticidade	66
Figura 21 – Aparato envolvendo rompedor e extensômetros.....	67
Figura 22 – Ensaio t_{500}	69
Figura 23 – Espalhamento.....	70
Figura 24 – Espalhamento da mistura C0 sem anel J (esquerda); com anel J (direita)	71
Figura 25 – Anel J	71
Figura 26 – Resistência à compressão (MPa)	72
Figura 27 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à compressão fibra ancorada	74
Figura 28 – Intervalo de confiança 95% para resistência à compressão fibra corrugada.....	75
Figura 29 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à compressão fibra reta.....	76
Figura 30 – Resistência à tração (MPa)	77
Figura 31 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à tração fibra ancorada.....	78
Figura 32 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à tração fibra corrugada.....	79
Figura 33 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à tração fibra reta	80

Figura 34 – Módulo de elasticidade (GPa).....	81
Figura 35 – Intervalo de confiança de 95% para módulo elasticidade fibra ancorada.....	82
Figura 36 – Intervalo de confiança de 95% para módulo elasticidade fibra corrugada	83
Figura 37 – Intervalo de confiança de 95% para módulo elasticidade fibra reta	84
Figura 38 – Ensaio de fadiga.....	85
Figura 39 – Intervalo de confiança de 95% para fadiga fibra ancorada.....	86
Figura 40 – Intervalo de confiança de 95% para fadiga fibra corrugada	86
Figura 41 – Intervalo de confiança de 95% para fadiga fibra reta	87
Figura 44 – Ganho resistência à compressão 7 dias.....	89
Figura 43 – Ganho resistência à compressão 28 dias.....	90
Figura 44 – Ganho resistência à tração 7 dias.....	91
Figura 45 – Ganho resistência à tração 28 dias.....	92
Figura 46 – Ganho módulo de elasticidade 7 dias.....	93
Figura 47 – Ganho módulo de elasticidade 28 dias.....	93
Figura 48 – Ganho resistência à fadiga 28 dias.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição e propriedades de misturas de concreto autoadensável	30
Tabela 02 – Requisitos especificados para cada classificação	35
Tabela 03 – Requisitos do fator de forma mínimo	36
Tabela 04 – Características CP – V ARI	47
Tabela 05 – Porcentagem de material pulverulento no agregado.....	49
Tabela 06 – Valores da massa específica aparente da areia	50
Tabela 07 – Valores da massa específica aparente da brita.....	51
Tabela 08 – Valores da massa específica do fíler calcário	52
Tabela 09 – Valores da superfície específica do fíler.....	52
Tabela 10 – Características das fibras de aço utilizadas.....	53
Tabela 11 – Dosagem pasta de cimento	55
Tabela 12 – Determinação esqueleto granular	56
Tabela 13 – Traço do concreto controle	58
Tabela 14 – ANOVA Fator duplo para resistência à compressão aos 7 dias	73
Tabela 15 – ANOVA Fator duplo para resistência à compressão aos 28 dias	73
Tabela 16 – ANOVA Fator duplo para resistência à tração aos 7 dias	77
Tabela 17 – ANOVA Fator duplo para resistência à tração aos 28 dias	77
Tabela 18 – ANOVA Fator duplo para módulo de elasticidade aos 7 dias.....	81
Tabela 19 – ANOVA Fator duplo para módulo de elasticidade aos 28 dias.....	81
Tabela 20 – ANOVA Fator duplo para fadiga aos 28 dias.....	85
Tabela 21 – Granulometria areia	105
Tabela 22 – Granulometria brita.....	107
Tabela 23 – Resistência à compressão 7 dias	109
Tabela 24 – Resistência à compressão 28 dias	111
Tabela 25 – Resistência à tração 7 dias	113
Tabela 26 – Resistência à tração 28 dias	115
Tabela 27 – Módulo de elasticidade 7 dias	117
Tabela 28 – Módulo de elasticidade 28 dias	119
Tabela 29 – Fadiga 28 dias	121

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivo Geral.....	17
1.2 Objetivos Específicos	17
1.3 Justificativa	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Concreto Autoadensável	20
2.1.1 Histórico.....	20
2.1.2 Propriedades no Estado Fresco	22
2.1.3 Propriedades no Estado Endurecido.....	24
2.1.3.1 Resistência à Compressão e à Tração.....	24
2.1.3.2 Módulo de Elasticidade.....	25
2.1.3.3 Comportamento à fadiga do concreto	26
2.1.4 Materiais e dosagens	27
2.1.4.1 Cimento.....	27
2.1.4.2 Adições minerais.....	27
2.1.4.3 Agregados	28
2.1.4.4 Aditivos.....	29
2.1.4.5 Dosagem.....	29
2.1.5 Aplicações	31
2.2 Concreto com Fibras	33
2.2.1 Histórico.....	33
2.2.2 Fibras de aço	34
2.2.3 Compósito e a Interação Fibra matriz	36
2.2.4 Propriedades no Estado Fresco	39
2.2.5 Propriedades no Estado Endurecido.....	40
2.2.5.1 Resistência à Compressão e à Tração.....	41

2.2.5.2 Comportamento à fadiga do concreto	42
2.2.6 Dosagem de concretos com fibras.....	43
2.2.7 Aplicações	44
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	46
3.1 Materiais.....	47
3.1.1 Cimento Portland	47
3.1.2 Água	48
3.1.3 Agregados	48
3.1.3.1 Agregado Miúdo	48
3.1.3.2 Agregado Graúdo	50
3.1.4 Fíler Calcário.....	51
3.1.5 Fibra de Aço.....	52
3.1.6 Aditivo Superplastificante.....	53
3.2 Métodos.....	53
3.2.1 Dosagem do Concreto Autoadensável	54
3.2.1.1 Otimização da pasta	54
3.2.1.2 Esqueleto Granular	55
3.2.1.3 Concreto autoadensável.....	58
3.2.2 Incorporação de Fibras de Aço ao Concreto	59
3.2.3 Ensaio no estado fresco do concreto.....	60
3.2.3.1 Ensaio de espalhamento e t_{500}	61
3.2.3.2 Anel J	62
3.2.4 Ensaio no estado endurecido do concreto.....	63
3.2.4.1 Resistência à compressão	63
3.2.4.2 Resistência à tração	64
3.2.4.3 Módulo de elasticidade.....	65
3.2.4.4 Ensaio de Fadiga	66
3.2.5 Análise estatística.....	68

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	69
4.1 Ensaios no estado fresco do concreto.....	69
4.1.1 Ensaio de espalhamento e t_{500}	69
4.1.2 Anel J	70
4.2 Ensaios no estado endurecido do concreto.....	72
4.2.1 Resistência à compressão	72
4.2.2 Resistência à tração	76
4.2.3 Módulo de elasticidade.....	80
4.2.4 Ensaio de Fadiga	84
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	88
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE A – GRANULOMETRIA AREIA NATURAL	104
APÊNDICE B – GRANULOMETRIA BRITA.....	106
APÊNDICE C – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 7 DIAS	108
APÊNDICE D – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 28 DIAS	110
APÊNDICE E – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 7 DIAS	112
APÊNDICE F – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 28 DIAS	114
APÊNDICE G – ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE 7 DIAS	116
APÊNDICE H – ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE 28 DIAS	118
APÊNDICE I – FADIGA 28 DIAS	120

1 INTRODUÇÃO

O consumo de concreto é maior quando comparado a alguns anos atrás. Esse consumo fica na ordem de 11 bilhões de toneladas por ano. Mesmo o concreto não sendo tão resistente e nem tão duro quanto o aço, é um material muito utilizado na engenharia. Um desses motivos é o concreto ser facilmente empregado em elementos estruturais possibilitando diferentes formas e tamanhos. Pela sua característica no estado plástico, o seu fluxo é favorecido para o interior das formas, e após endurecido, toma a forma desejada. Outra razão pode ser associada à rápida disponibilidade do material e ao seu baixo custo. Além desses motivos, pode ser ressaltado ainda a boa resistência do concreto quando submetido a ação da água, quando comparado ao aço e madeira (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Até 2003, o dimensionamento das estruturas de concreto armado era realizado considerando-se essencialmente a resistência à compressão do concreto. A partir da vigência da NBR 6118 em 2003, as estruturas são projetadas levando-se em consideração a classe de agressividade ambiental, na qual as mesmas estarão expostas, e a vida útil de projeto e assim são apresentadas recomendações mínimas a serem adotadas para que esses requisitos sejam atingidos.

Além da presença de poros, pode ser levado em consideração também, as falhas de concretagem, que por diversos motivos, como altas taxas de armadura, seções esbeltas, são presentes nas estruturas de concreto, conforme pode ser observado na Figura 01, o que também impacta na redução da durabilidade das estruturas de concreto.



**Figura 01 - Falha de concretagem (“bicheiras”)
Fonte: Adaptado Repette, 2011.**

Para evitar problemas como esse, surge o concreto autoadensável (CAA), o qual possui elevada fluidez, com coesão adequada, capaz de preencher as formas somente pela ação do seu próprio peso. Esse tipo de concreto surgiu no Japão, justamente pela identificação dos engenheiros japoneses, que o adensamento inadequado das estruturas, acabava sendo uma das principais causas do comprometimento da durabilidade das estruturas. Atualmente, o seu uso é crescente, tanto nos setores de pré-fabricados como pré-moldados, como também na aplicação de concretos *in loco* (REPETTE, 2011).

Se no estado plástico, o CAA apresenta grande diferença quando comparado ao concreto convencional, em seu estado endurecido, quando se tem mesma relação água/cimento, o CAA consegue alcançar resistências mecânicas, pouco maiores que o concreto convencional, porém sem tal diferença quando analisado o módulo de elasticidade (PERSSON, 2001).

Mesmo o CAA sendo um avanço na área do concreto, pelo fato das suas vantagens enquanto no seu estado plástico, o CAA ainda assim tem algumas mesmas desvantagens que o concreto convencional, como baixa resistência à tração, e uma baixa resistência a esforços dinâmicos como o caso da fadiga. Essa baixa resistência à tração pode ser associada a rápida propagação de fissuras sob uma tensão aplicada.

Dentro desse contexto, é possível destacar o surgimento de um outro tipo de concreto, o concreto reforçado com fibras (CRF). Esse material é composto por pelo menos duas fases distintas principais, sendo elas, a fase do concreto e a da fibra de aço. As fibras podem ser compreendidas como elementos os quais possuem comprimento bem maior que a seção transversal. Dessa forma, quando o concreto começa a fissurar, as fibras atuam como elemento de contenção da propagação dessas fissuras, melhorando assim potencialmente as características de resistência à tração e ainda a esforços dinâmicos como o caso da fadiga (FIGUEIREDO, 2011).

O tipo de fibra e a quantidade empregada nos concretos, tem efeito direto nas propriedades mecânicas do CRF. Com relação à quantidade empregada, é possível classificar em três categorias sendo elas as de baixa fração volumétrica (menor que 1%), fração volumétrica moderada (entre 1% e 2%), e ainda alta fração volumétrica (maior que 2%) (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Como principal desvantagem do emprego das fibras de aço, tem-se a perda de trabalhabilidade do concreto. Dependendo ad forma de mistura, as fibras acabam formando novelos, dificultando assim a mistura do concreto, sendo indicados então, concretos com teores de argamassa maiores. Dessa forma, tendo de um lado, um material

com grande potencial quando analisadas as suas propriedades no estado fresco que é o CAA, com inúmeras vantagens quando comparado ao concreto convencional; e do outro um outro material, que em seu estado endurecido se mostra com propriedades distintas melhoradas, quando comparado também ao concreto convencional, porém com desvantagem em seu estado plástico. A mistura desses dois materiais, CAA com o CRF se mostra algo de estudo importante. Dosar simultaneamente um concreto autoadensável com fibras de aço que mantenha todas as suas características de auto adensabilidade em seu estado plástico, para assim resultar em um compósito com melhores propriedades mecânicas em seu estado endurecido é algo que requer cuidados e considerações, para então resultar em um material satisfatório.

Dessa forma, esta pesquisa estrutura-se em: Capítulo 1, abrangendo Introdução onde se contextualiza o assunto e apresenta-se a justificativa, os objetivos geral e específicos do trabalho; Capítulo 2, apresentando a revisão bibliográfica do tema; Capítulo 3, onde são descritos os materiais e métodos empregados na pesquisa; Capítulo 4, no qual apresenta-se os resultados; Capítulo 5, apresenta-se a síntese dos resultados; Capítulo 6, são feitas as considerações finais e, posteriormente são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do trabalho. Por último os Apêndices com as Tabelas.

1.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o desempenho do concreto autoadensável quando incorporado diferentes tipos de fibras de aço, em diferentes teores.

1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as características de auto adensabilidade do concreto, quando incorporados os diferentes tipos de fibras com os diferentes teores;
- Avaliar a perda de fluidez do concreto com o aumento do teor de adição dos diferentes tipos de fibras;
- Avaliar o comportamento das propriedades mecânicas do concreto com o aumento do teor de diferentes tipos de fibras;
- Determinar a resistência à fadiga do concreto utilizando um ensaio não normatizado;

1.3 Justificativa

A medida que a construção civil evolui, simultaneamente técnicas e materiais necessitam a acompanhar. O material de construção mais utilizado é o concreto. Tal composto, que teve uma grande evolução desde a sua origem, ainda é objeto de estudo nos presentes dias. Atualmente, é possível obter diferentes tipos de concretos, com diferentes aplicações, facilitando assim o seu emprego em diversos ramos da engenharia civil.

O concreto autoadensável (CAA) é um desses tipos de concreto, e foi uma grande descoberta das últimas décadas. Defeitos de concretagem podem ser eliminados, moldagem em estruturas com formatos mais complexos conseguem ser obtidas, graças a sua capacidade de alta fluidez, coesão e resistência à segregação. A grande capacidade de fluir entre as armaduras faz com que não mais seja necessário o adensamento por vibração externa, resultando assim uma mão de obra reduzida, e conseqüentemente uma construção acelerada.

Entretanto, mesmo que o concreto autoadensável ofereça essas melhorias em relação ao concreto convencional, suas características no estado endurecido são semelhantes, ou seja, ainda possui uma baixa resistência à tração, baixa resistência quando submetido a carregamentos cíclicos e um baixo valor de módulo de elasticidade, quando comparado a materiais dúcteis, como o aço por exemplo.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a baixa resistência do concreto à tração, resulta na rápida propagação das microfissuras que possui, quando o material é submetido a uma tensão aplicada.

A incorporação de fibras de aço no concreto, resulta na melhoria da ductilidade e tenacidade do material, assim como um aumento de resistência desse composto, quando exposto a um carregamento que tende a gerar tensões de tração (GAVA et al, 2014). Apesar do mercado do concreto reforçado com fibras ser ainda pequeno, quando comparado à produção total de concreto, houve um acréscimo anual de 20% na América do Norte (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Em se tratando de durabilidade do concreto, por muito tempo esta propriedade foi associada apenas à resistência. Entretanto, atualmente é possível correlacionar também a demais fatores. Um material pode não ser resistente, quando analisado à fadiga

por exemplo, isso porque a cada ciclo de carregamento, as microfissuras presentes possuem uma tendência de se propagar, resultando em uma redução da área útil para transferência da tensão. Dessa forma, a fibra de aço incorporada ao concreto, pode resultar em uma melhoria quando analisado a resistência à fadiga.

De acordo com a NBR 15530 (ASSOCIAÇÃO..., 2007) as fibras podem ser classificadas em três tipos (ancoradas, corrugadas e retas) e divididas em três classes (cada uma de acordo com a sua origem). Além disso, podem ser incorporadas ao concreto com diferentes teores.

Dessa forma, a importância do presente estudo está em agregar as vantagens de se ter um concreto com fibras (analisando a influência do tipo de fibra, assim como a quantidade acrescida), sem que sejam perdidas as vantagens do concreto autoadensável no seu estado fresco, fazendo assim com que suas vantagens combinadas resultem em um compósito importante para a construção civil.

A pesquisa pode ser classificada como qualitativa, tendo em vista que busca definir a influência que se obtém os concretos autoadensáveis com diferentes teores e tipos de fibras, analisando os resultados tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Entretanto, foram analisados dados numéricos, provenientes dos ensaios experimentais, classificando assim a pesquisa como quantitativa. Dessa forma, é possível enquadrar a pesquisa como sendo qualitativo – quantitativo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto Autoadensável

2.1.1 Histórico

O concreto tem sua utilização crescendo, e paralelamente vem se observando uma grande deficiência na concretagem das estruturas, resultando assim problemas relacionados a durabilidade reduzindo a qualidade das peças concretadas. Em 1988 foi desenvolvido o concreto autoadensável com a finalidade de eliminar tais problemas de concretagem. Foi desenvolvido no Japão pelo Professor Hajime Okamura e tem se mostrado benéfico economicamente por diversos fatores como: construção acelerada, mão de obra reduzida, acabamento da superfície melhorado; aumento da durabilidade por ser mais fácil de adensar, ganho de liberdade de formas e dimensões bem como concretagem de peças com seção reduzida ou alta taxa de armadura, elimina o barulho da vibração, o local de trabalho se torna mais seguro devido a diminuição do número de funcionários, pode ter um ganho ecológico pela possibilidade de utilização de resíduos industriais como cinza volante (OUCHI, 1999; NEHDI, 2004; TUTIKIAN, 2008).

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), existem relatos de que na Itália (na doca de São Marco em Trieste) que foi construída em 1980, foi utilizado um lançamento submerso de 40.000 m³ de concreto e para tal, foi desenvolvido um concreto com superplastificante que possuísse tanto alta fluidez quanto boa coesão. Com uma dosagem alta de superplastificante (7 kg/m³) e um consumo de cimento de 400 kg/m³ foi conseguido desenvolver um concreto reoplástico autonivelante e altamente coeso.

O concreto autoadensável pode ser definido como um compósito de alta resistência à segregação, boa deformabilidade que permite ser lançado em peças com grande taxa de armadura preenchendo-as sem que haja vibração (mecânica ou manual), devido o seu peso próprio sem que os materiais que o compõem se separem (SHINDOH e MATSUOKA, 2003). Entretanto, o concreto autoadensável apenas pode-se diferenciar do concreto convencional quando o mesmo se encontra no estado fresco, tendo características semelhantes quando no estado endurecido (TUTIKIAN, 2008).

O concreto autoadensável deve manter unido o esqueleto granular durante todo o seu processo de produção, transporte e aplicação sendo que isso é possível graças as suas características de fluidez, coesão e resistência à segregação (KHAYAT, 2000). Outra

característica relevante do CAA é que ele não deve sofrer exsudação. Segundo Neville (1999), exsudação é a subida de água para a superfície do concreto que foi recém lançado, podendo provocar o desenvolvimento de fissuras, com uma tendência maior ao redor da armadura pelo fato de ser restrito o preenchimento do concreto plástico.

De acordo com Okamura e Ouchi (2003), no Japão desde 1983 o principal tópico de interesse foi a questão da durabilidade nas estruturas de concreto. Uma estrutura com boa durabilidade era resultado de uma boa vibração/compactação do concreto, o qual era obtido por meio de mão de obra devidamente especializada. Entretanto, funcionários com essas características na indústria da construção civil japonesa eram cada vez mais escassos, o que refletia na qualidade das estruturas de concreto armado. Além disso, de acordo com Tutikian (2008), a baixa trabalhabilidade ou fluidez dos concretos convencionais dificulta o adensamento, principalmente quando se tem peças com altas taxas de armadura. Dessa forma, diante das dificuldades anteriormente citadas, o concreto autoadensável pode ser uma solução tendo em vista que o mesmo é adensado única e exclusivamente através do seu próprio peso sem que haja a necessidade de vibração externa, resultando assim em estruturas de concreto com maior durabilidade.

Segundo Shindoh e Matsuoka (2003), o concreto autoadensável teve seu desenvolvimento intenso e rápido até que se tornou um importante item para a construção. Com o seu surgimento na década de 80, no Japão, estudos e protótipos desencadearam pesquisas, publicações e projetos desenvolvidos (OKAMURA; OUCHI, 1999). De acordo com Billberg (1999) e Gomes (2002), na década de 90 o concreto autoadensável surge na Suécia, e na sequência é aceito no mercado internacional.

Entretanto, o concreto autoadensável apresenta algumas desvantagens, como um controle tecnológico e aplicação com cuidados especiais desde o transporte até a sua aplicação para evitar segregação; não ser de fácil obtenção, necessitando de mão de obra adequada e ainda ter um menor tempo de aplicação, devido a ação dos aditivos (LISBOA, 2004).

Nos dias de hoje, o CAA tem seu interesse cada vez mais acentuado, por ter se destacado em todo o mundo com vários trabalhos publicados em congressos e seminários que trabalham especialmente com o concreto autoadensável, além ainda de aplicações por construtoras que a justifica devido as suas vantagens. No Brasil o número de pesquisas vem crescendo assim como a sua aplicação. As principais justificativas para tal, são a diminuição do tempo de concretagem, um melhor acabamento e a qualidade do concreto quando comparado com um concreto vibrado (BARROS, 2009).

2.1.2 Propriedades no Estado Fresco

Nunes (2001) afirma que as características de um concreto para ser considerado como autoadensável devem ser resistência a ocorrência de segregação, capacidade de preenchimento e a capacidade de passar entre espaços estreitos. Esse adequado comportamento, exige um compósito com elevada fluidez e coesão entre os componentes, e moderada viscosidade, para que dessa forma seja possível obter um fluxo contínuo e uniforme de toda a mistura, resultando assim um preenchimento de toda a forma sem segregação e ainda sem que as armaduras o bloqueiem.

Essas características do concreto autoadensável são correlacionadas e é necessária uma diferenciação entre elas. Uma baixa habilidade de passagem e a segregação, podem agir combinadas ou ainda separadamente resultar em um bloqueio do concreto. Ou seja, a tendência de segregação pode ser prejudicial na medição do bloqueio da mistura (TESTING-SCC, 2005).

A capacidade de preenchimento vai variar conforme a fluidez do concreto e se caracteriza pela distância percorrida pelo concreto a partir do ponto onde ele é lançado (ou ainda pela capacidade de fluir e preencher através do seu peso próprio) e pela viscosidade de deformação (coesão da mistura), e está ligada diretamente a capacidade de passagem (NUNES, 2001; GOMES, 2002; TUTIKIAN, 2004).

O concreto autoadensável tem maior propensão a segregação (separação da argamassa do concreto com o agregado graúdo) quando a viscosidade é muito baixa. Dessa forma, como a tensão de escoamento é muito baixa, é necessária uma viscosidade moderada. Essa resistência melhora a uniformidade do concreto durante as etapas do transporte, do lançamento e da consolidação, e é influenciada pela coesão e viscosidade (GOMES, 2002).

A capacidade de passar pelos obstáculos, como é o caso do espaço estreito entre as barras de aço, sem que haja segregação ou obstrução do fluxo é o que caracteriza a habilidade passante do concreto autoadensável, e essa é influenciada pelas características dos agregados (principalmente a dimensão máxima característica do agregado graúdo) e a viscosidade da argamassa e pasta. O atrito entre os obstáculos e o concreto podem resultar na formação de um bloqueio a passagem do material prejudicando assim a sua aplicação, tendo essa probabilidade aumentada quanto maior for a dimensão máxima do agregado graúdo (GOMES, 2002; TUTIKIAN, 2004).

Repetto (2011) afirma que além da habilidade de preenchimento dos espaços, habilidade de passar por restrições e a capacidade de resistir à segregação, outras características que são comuns ao concreto convencional são ao concreto autoadensável, sendo elas o tempo em aberto, ou seja, a característica de escoar por um determinado espaço de tempo sem que seja comprometida sua aplicação; o acabamento superficial (qualidade da superfície mantendo a homogeneidade de textura e cor); a bombeabilidade que está ligada a capacidade de lançar o concreto a maiores distâncias ou alturas pelo bombeamento e ainda suas características mecânicas e sua durabilidade que são propriedades que o concreto deve satisfazer mediante a normas vigentes.

O comportamento reológico (estudo da deformação e do fluxo) do concreto autoadensável, é compreendido pelo modelo de Bingham. A caracterização é feita por dois parâmetros, sendo eles a tensão de cisalhamento (τ) e a viscosidade plástica (μ). A tensão de cisalhamento se caracteriza pela força necessária para que haja a movimentação do concreto, enquanto que a viscosidade plástica é a medida da taxa de fluxo do material. O concreto autoadensável não segrega mesmo possuindo uma alta fluidez, devido ao fato da baixa tensão de cisalhamento e a alta viscosidade (OKAMURA, 2003), conforme mostra a Figura 02:

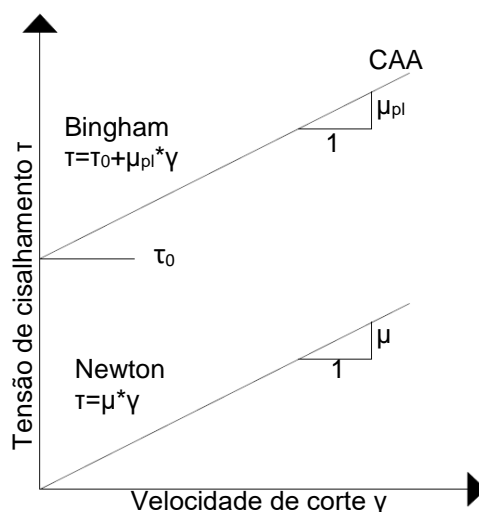


Figura 02 - Modelos reológicos
Fonte: Tutikian e Dal Molin, 2008.

É possível observar, que para que haja o movimento do concreto, se faz necessário uma tensão inicial (τ_0), sendo esse valor próximo de zero, e com isso é possível definir uma equação de 1º grau do comportamento reológico, a qual correlaciona a tensão de cisalhamento nas ordenadas e a viscosidade plástica nas abcissas.

2.1.3 Propriedades no Estado Endurecido

Domone (2007) cita que mesmo os diversos trabalhos desenvolvidos, desde que se foi desenvolvido o CAA, relacionarem a obtenção e avaliação das propriedades no estado fresco no concreto, são as propriedades no seu estado endurecido que possuem caráter fundamental na elaboração de projetos estruturais. Gomes et. al. (2006), também afirma que devido ao fato das vantagens do CAA estarem relacionadas com o estado fresco do concreto, as propriedades mecânicas têm menor discussão, porém estudos apontam melhorias nessas propriedades do CAA quando comparado ao concreto convencional.

2.1.3.1 Resistência à Compressão e à Tração

Mehta e Monteiro (2008) definem resistência como sendo a quantidade de tensão que precisa para o material romper. Devido ao fato da resistência do concreto ser função do processo de hidratação do cimento, as especificações e ensaios são baseados em corpos de prova curados a condições padrão de umidade e temperatura. A resistência à compressão é uma das propriedades mais importantes do concreto, pois através da mesma é possível caracterizar o material, bem como prever sua durabilidade.

De acordo com os mesmos autores, o concreto pode ser definido como um compósito, porém, algumas características não seguem as regras da mistura. Quando submetido a cargas de compressão, tanto a pasta de cimento hidratada quanto o agregado, se fossem ensaiados separados, apresentariam rompimento elástico, enquanto que o concreto tem comportamento inelástico antes da sua ruptura. Assim como a resistência do concreto é inferior a resistência individual desses componentes. Isso pelo fato de existir uma região formada entre argamassa e agregado graúdo, a zona de transição.

O comportamento do concreto autoadensável tanto na tração quanto na compressão é parecido com o concreto convencional. A faixa de resistência à compressão do CAA pode variar de 20 MPa a mais de 100 MPa, sendo mais difícil obter CAA de baixa resistência. O CAA apresenta maior homogeneidade entre pasta e agregados, do que o concreto convencional, pela maior dispersão das partículas de cimento geradas pela ação de aditivos superplastificantes (REPETTE, 2011).

A resistência à tração do concreto autoadensável não é maior do que a do concreto convencional, podendo ser considerada como igual ou pouco superior, segundo

afirma Walraven (2010). De acordo com Holschemacher (2004), algumas composições de CAA podem ter um valor de até 40% superior quando comparados ao concreto convencional, possibilitando assim estudos e pesquisas que visem uma possível redução na armadura mínima em dimensionamento de estruturas de concreto armado. Dessa forma, modelos de correlações de resistência à tração com a resistência à compressão desenvolvidas para concretos convencionais, tendem a subestimar a resistência à tração do concreto autoadensável, porém não é estimado valores superiores, o que sob o aspecto de segurança, é satisfatório.

2.1.3.2 Módulo de Elasticidade

Mehta e Monteiro (2008) definem módulo de elasticidade como sendo a razão entre a tensão e a deformação reversível. Para materiais homogêneos, o módulo elástico pode ser entendido como uma medida das forças de ligação Interatômicas e não tem influências por alterações microestruturais. Porém, o mesmo não pode ser afirmado para materiais multifásicos heterogêneos como é o caso do concreto. O módulo de elasticidade do concreto pode variar de 14 GPa a 40 GPa. A importância do conhecimento do limite elástico em um projeto estrutural se deve pela representação da tensão máxima permitida antes que o material sofra uma deformação permanente.

Gomes et. al. (2006) apresenta que existem divergências com relação ao módulo de elasticidade do CAA, de acordo com os trabalhos estudados. Alguns constatam que o valor diminui quando compara com o módulo de elasticidade do concreto convencional. Em contrapartida, em outros trabalhos, os autores não observaram diferença alguma entre os valores obtidos.

Repetto (2011), especifica que pelo fato do CAA ter menor quantidade de agregado graúdo, seu módulo de elasticidade tende a ser menor que o do concreto convencional, dada uma mesma resistência à compressão. Entretanto, essa diferença vai variar de acordo com o nível de resistência do concreto, e de sua composição, significando assim que não é possível estabelecer uma comparação generalizada com relação a essa propriedade. O concreto autoadensável que em sua dosagem apresenta uma menor quantidade de agregado graúdo, pode ter o valor do módulo de elasticidade em até 10% menor que o de um convencional à mesma resistência. Porém, um CAA com maior teor de britas, resulta em um menor espalhamento (da ordem de 550 mm e 650 mm), mas pode obter um módulo da mesma ordem que um concreto convencional.

2.1.3.3 Comportamento à fadiga do concreto

Hibbeler (2009) afirma que quando um material é submetido a ciclos repetidos de tensão ou deformação, a sua estrutura pode romper-se. Por esse comportamento entende-se fadiga, e a falha ocorre a uma tensão menor que a tensão de ruptura desse material. A proveniência dessa falha se dá por regiões microscópicas, geralmente na superfície de um elemento, sendo que a tensão localizada acaba se tornando maior que a tensão média a qual age na seção transversal.

Callister (2002), determina que a fissura gerada por fadiga em concreto é de natureza frágil, sendo que a deformação associada, ocorre pelo processo de origem de microfissuras, levando em consideração que geralmente a superfície de ruptura é perpendicular à direção de aplicação da tensão. O processo de ruptura é caracterizado por três etapas:

1ª etapa: origem da fissura, sendo que uma microfissura é formada em um local onde é alta a concentração de tensão;

2ª etapa: a fissura é propagada sendo que é avançada em incrementos a cada ciclo;

3ª etapa: ruptura final, que acontece de forma rápida, quando a fissura atinge a abertura crítica.

Medeiros (2012) cita que a fadiga, pode ser determinada através de ensaios laboratoriais, sendo que os dados coletados geralmente são apresentados de uma forma gráfica, onde é correlacionado tensão ou deformação específica com o número de ciclos de carga. A relação específica que quanto maior for a magnitude da tensão aplicada, menor será o número de ciclos que o material será capaz de suportar, antes que o mesmo venha a romper.

De acordo com o mesmo autor, existem muitos estudos de fadiga em concreto, sendo que o enfoque desses estudos resultou em diferentes tipos de ensaio para a sua determinação como tração direta, tração na flexão, compressão, sendo que assim, não existe um ensaio padrão o qual especifique a caracterização do comportamento à fadiga do concreto. Fatores como tipo de ensaio, forma de carregamento (relação entre tensões máximas e mínimas, frequência do carregamento), influenciam diretamente no desempenho a resistência à fadiga que o concreto possui.

2.1.4 Materiais e dosagens

O concreto convencional é composto por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água. Para o concreto autoadensável, além desses mesmos constituintes, é necessário a incorporação de adições e aditivos. A alta fluidez é alcançada com o uso do aditivo, enquanto que para o aumento da quantidade de finos se faz o uso das adições.

2.1.4.1 Cimento

Repetto (2011) especifica que todos os tipos de cimento Portland que são empregados ao concreto convencional, também podem ser empregados quando em concreto autoadensável. Quanto maior a finura do cimento, maior a indicação para essa finalidade. O tipo de cimento variando, ou ainda mesmo variação do fabricante, afetam diretamente as propriedades do CAA quando no estado fresco, levando em consideração que a tensão de escoamento e a viscosidade dependem diretamente das características reológicas da pasta que compõem o concreto. Para os cimentos com maiores teores de C_3A , maior finura e maior teor de álcalis, resulta em uma necessidade de uma quantidade maior de aditivo superplastificante e ainda podem apresentar pequena manutenção de fluidez do CAA.

2.1.4.2 Adições minerais

O concreto autoadensável possui a importante característica de uma elevada resistência à segregação, mesmo possuindo uma alta fluidez ou deformabilidade quando no estado fresco. Para que haja o aumento da coesão da mistura e não haja segregação do agregado graúdo, são utilizados geralmente adições minerais (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, para escolha de qual adição mineral utilizar, devem ser feitas análises técnicas e econômicas e podem ser diversas, porém que atendam a característica de possuir uma superfície específica maior que a do cimento. Além de garantir a resistência à segregação, as adições podem auxiliar na durabilidade do concreto, tanto analisando física como quimicamente. No caso físico, é possível ressaltar o aumento da densidade da mistura que é devido o preenchimento dos vazios, o refinamento da estrutura de poros e ainda a alteração da microestrutura da zona de transição, a qual terá

reduzida ou eliminada o acúmulo de água livre, a qual usualmente fica retida sob os agregados.

Considera-se adições ou ainda finos, os materiais cujas dimensões de partículas devem ser menores que 0,150 mm, sendo indicado que mais de 75% possuam dimensões menores do que 0,075 mm (REPETTE, 2011).

- Fíler calcário:

O mesmo autor referencia que o emprego de fíler calcário é o mais comumente utilizado em concreto autoadensável. Sua partícula possui o formato de prisma com faces retangulares, diferentemente de adições como escória e cinza volante e escória, as quais possuem partículas arredondadas, porém não tão lamelares quanto as partículas do pó de pedra. Possui ainda a capacidade de adsorver água resultando assim em maior resistência à exsudação e um aumento da viscosidade.

2.1.4.3 Agregados

Generalizando, todos os agregados miúdos (areias) são adequados para serem usadas em concreto autoadensável, e ainda podem ser tanto naturais, quanto artificiais. As areias naturais possuem uma recomendação maior pelo fato de possuírem forma mais arredondada e textura mais lisa, sendo necessário tomar precauções com o uso da areia artificial por geralmente apresentarem composição granulométrica com descontinuidade. Com relação ao tamanho das partículas, as areias grossas provocam a necessidade do aumento do teor da pasta (OKAMURA e OUCHI, 2003).

O agregado graúdo, possui limitação quanto ao seu tamanho, levando em consideração que é necessário que o concreto passe por lugares muitas vezes com dimensões reduzidas. Dessa forma, é indicado não utilizar agregados com diâmetro máximo superior as 19 mm, sendo mais comumente o uso entre 12,5 mm e 19 mm. Assim como para o agregado graúdo, é indicado o formato mais arredondado para o emprego em concreto autoadensável. A distribuição granulométrica influencia no empacotamento dos grãos, dessa forma podendo alterar a fração volumétrica das britas as quais serão incorporadas ao concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.1.4.4 Aditivos

Para uso em concreto autoadensável, existem dois que principalmente são utilizados, sendo eles os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. O primeiro tipo permite alcançar alta fluidez enquanto que o segundo garante um aumento na coesão, prevenindo assim a exsudação e segregação do concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

De acordo com Repette (2011), para ser possível obter a característica de autoadensabilidade, é indispensável o uso de aditivos superplastificantes. Os aditivos indicados para o CAA necessitam promover no mínimo a redução de 20% de água. Aditivos que são a base de policarboxilato promovem a dispersão entre as partículas através do efeito esférico, sem causar redução da viscosidade da pasta. Já os aditivos que tem base à ácidos sulfônicos de naftaleno formaldeído e melanina formaldeído provocam a dispersão entre as partículas através de repulsão eletrostática, porém implica em diminuição da tensão superficial do meio aquoso do concreto e conseqüentemente aumenta a chance segregação pelo fato de diminuir a viscosidade da pasta.

2.1.4.5 Dosagem

A quantia usada de cada material que compõem o concreto autoadensável pode ser entendida como dosagem ou ainda proporcionamento dos materiais. Devido ao fato do CAA necessitar satisfazer diversas características quando no estado fresco, a sua dosagem acaba se tornando algo mais dificultoso. Possuir uma grande capacidade de passar por regiões confinadas, elevada fluidez, adensar-se somente pelo peso próprio e resistir a segregação são algumas características difíceis de serem alcançadas, concomitantemente enquanto o concreto é dosado (REPETTE, 2011).

No Brasil, alguns métodos foram precursores, com destaque para os que foram propostos por Repette e Melo (Universidade Federal de Santa Catarina), Gomes (Universidade Federal de Alagoas), Helene e Alencar (Universidade de São Paulo), Toralles Carbonari (Universidade Estadual de Londrina), Dal Molin e Tutikian (Universidade Federal do Rio Grande do Sul).

A dosagem de um concreto autoadensável deve ser fundamentada em princípios não comuns, cujo objetivo é atender as propriedades que estabelecem uma relação entre

a capacidade da fluidez da mistura, junto da sua estabilidade, que dessa forma é possível garantir que não haverá segregação (GOMES e BARROS, 2009).

Repetto (2011) especifica algumas estratégias para dosagem do CAA e elas podem ser divididas em três:

- Preenchimento do esqueleto de agregado, onde é definido (teoricamente ou na prática) a composição de agregados os quais resultem no maior grau de empacotamento das partículas, onde seja obtido o menor índice de vazios;

- Controle da segregação, partindo do princípio que as propriedades reológicas da pasta governam a fluidez e a resistência à segregação do concreto;

- Incorporação de agregado em pasta, através de ensaios que definam a composição da pasta que atenda a condições relacionadas no quesito escoamento e na estabilidade. Com relação ao teor de aditivos, o qual inicialmente obtido em pasta, é ajustado nas fases de composição do concreto.

Para obtenção do concreto autoadensável, pode-se chegar utilizando métodos diferentes que resultam em proporções diferentes. A Tabela 01 apresenta alguns traços e propriedades de CAA utilizados por alguns autores:

Tabela 01 – Composição e propriedades de misturas de concreto autoadensável

Mistura	A	B	C	D	E	F
Dosagens (kg/m³)						
Cimento	400	465	20	207	330	360
Cinza Volante	-	-	127	207	-	-
Escória	-	-	184	-	-	-
Areia Padrão	1170	710	964	845	960	960
Agregado Graúdo	630	915	822	843	900	900
Água	190	175	176	188	180	180
Superplastificante	7,0	4,6	5,0	0,5	3,0	3,5
Agentes M V						
Goma	-	-	-	-	0,18	0,25
Sílica Ativa	-	65	-	-	30	-
Sílica Coloidal Ultrafina	-	-	8	-	-	-
Propriedades						
Abatimento (mm)	260	-	-	240	220	220
Espalhamento (mm)	-	730	800	-	-	-
Relação água/mc	0,47	0,33	0,40	0,45	0,50	0,50
Resistência Compressão 28 dias (MPa)	-	95	40	33	46	43

Fonte: Adaptado de Mehta e Monteiro (2008)
Misturas A, B e C: Collepardi, M. et al. (2004)
Mistura D: Bouzubaa, N.; Lachemi, M. (2001)
Misturas E e F: Khayat, K. H.; Guizani, Z. (1997).

A Mistura A, foi utilizada no final da década de 1970 para lançamento submerso de concreto autoadensável e não segregante. Já a Mistura B representa um CAA de alta resistência que foi utilizado na construção do World Trade Center em San Marino. Enquanto que a Mistura C representa um CAA indicado para estruturas maciças que exijam um controle no calor de hidratação (devido ao baixo consumo de cimento a elevação de temperatura não superou os 20°C).

A Mistura D demonstra que concretos autoadensáveis podem ter um custo mais baixo devido aos altos teores de adição de cinza volante. As Misturas E e F pertencem a um estudo, contendo pó de goma como modificador de viscosidade que foi combinado com um superplastificante à base de naftaleno sulfonado.

De acordo com Repette (2011), não existem restrições quanto aos teores dos materiais componentes do CAA. A dosagem pode ter variação, dependendo das características dos materiais disponíveis e de como serão misturados e aplicados ao concreto. Para CAA que são produzidos com a adição de finos e materiais comumente empregados na confecção do concreto convencional, geralmente o teor de cimento se encontra na faixa de 350 a 450 kg/m³, incorporação de partículas finas entre 150 a 250 kg/m³, relação água finos em volume no intervalo de 0,8 a 1,1 (fino considerado como sendo menor que 0,075 mm), volume de areia na fração de argamassa entre 35% e 50% e o volume de agregado graúdo no concreto na faixa de 25% a 35%.

2.1.5 Aplicações

Mehta e Monteiro (2008) afirmam que tanto no Japão quanto na Europa, o concreto autoadensável é utilizado para concretagens submersas e ainda para construções de estruturas onde tem um teor alto de armaduras (estruturas densamente armadas). Já na América do Norte sua utilização é em grande escala em fábricas de pré-moldado onde existe um nível maior de controle de qualidade.

De acordo com Repette (2011), a utilização do concreto autoadensável tende a ser maior com o passar do tempo. Quando comparado com o concreto convencional, o CAA apresente uma série de vantagens, podendo ser aplicados em todas as obras e quase sempre substituindo o concreto convencional. Isso pelo fato de algumas vezes a alta fluidez ser um fator negativo, como o caso de concretagem de escadas *in loco*, vigas invertidas, desníveis, rampas e rebaxos não confinados por formas nas lajes.

Ainda segundo o mesmo autor, é possível verificar exemplos de aplicações de CAA em reservatórios com ausência de juntas frias, pisos e pavimentos, revestimentos de túneis, construção industrializada de casas com concretagem única, entre outras aplicações.

Segundo Domone (2006) *apud* Tutikian e Dal Molin (2008), desde a primeira aplicação divulgada de concreto autoadensável (que ocorreu no Japão), 67% das obras que utilizaram o CAA, o fizeram pelas vantagens técnicas do material quando comparado ao concreto convencional; 14% optaram pelo CAA pela questão econômica pela redução do número de trabalhadores ou ainda do tempo de construção; e ainda outros 10% pelo motivo do material ser uma inovação.

Repetto (2011) cita obras notórias foram produzidas com o CAA, como o caso da torre Burj Khalifa que possui mais de 800 metros de altura. Toda a estrutura foi executada com um concreto de elevada resistência (classe C80) e módulo de elasticidade de 48 GPa, e cujo espalhamento foi de 550 mm. A dosagem desse concreto empregou cinza volante e sílica ativa, o que significou em 484 kg/m³ de material cimentante, e uma relação água/aglomerante de 0,30. Porém, o que mais se destacou foi a questão de bombear esse concreto a uma altura próxima de 600 metros, sem que houvesse estações intermediárias.

Outra obra impactante, com aplicação do CAA foi no Japão, na construção da ponte Akashi Kaiokyo. A ponte é a maior suspensa do mundo, com um vão principal de 1991 metros. A dosagem desse concreto empregou cimento com baixo calor de hidratação e adições de escória de alto forno e cinza volante. O espalhamento foi de 550 – 650 mm enquanto que a resistência a compressão foi de 24 MPa.

No ocidente, nos Estados Unidos da América, o CAA teve repercussão quando empregado na concretagem da laje de embasamento do Edifício Trump Tower, localizado em Chicago. O que chamou a atenção é que em apenas 24 horas foram transportados um total de 3800 m³ em 600 viagens de caminhões betoneira. O concreto foi dosado para apresentar baixo calor de hidratação, e alcançou aos 28 dias uma resistência à compressão de 69 MPa.

A aplicação na indústria de pré-moldados é crescente, isso incluindo o Brasil. Em países da Europa como França e Holanda, 50% do concreto utilizado nessas empresas é CAA. No Brasil, mesmo com o aumento do consumo do CAA, o uso é pequeno, porém o potencial cresce à medida que a mão de obra fica mais cara e mais escassa e assim como obras de maior porte e complexidade sejam construídas.

2.2 Concreto com Fibras

2.2.1 Histórico

O concreto possui o posto de material estrutural que mais é utilizado no mundo devido a uma série de características que possui. Entretanto também, existem algumas limitações como a baixa deformação antes de romper quando solicitado a tração, comportamento frágil, e uma reduzida resistência à tração quando comparado a resistência à compressão. Assim, uma forma de contornar essas limitações, é o incremento de fibras (FIGUEIREDO, 2011).

O concreto reforçado com fibras (CRF) contém cimento, agregado miúdo, agregado graúdo, água e fibras. Pode ainda conter adições como pozolana. As fibras podem ser de vários tamanhos e formas, sendo de aço, vidro, plástico e materiais naturais, entretanto, tanto para a maioria da utilização em peças estruturais e não estruturais, a mais utilizada é a de aço (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O mesmo autor refere ainda, que em um contexto histórico, é possível perceber o conceito de reforço com fibras, com os egípcios, que usavam palha, para então reforçar os tijolos que eram feitos de barro. Outro uso histórico, é visível através do pássaro João-de-Barro o qual emprega a palha junto com o barro para a construção de seus ninhos.

Velasco (2008) afirma que a primeira patente de compósitos reforçados com fibras foi registrada em 1874 por Berard. Swamy (1975) relata que em 1910, Porter considerou o conceito da inclusão de pequenos pedaços de aço reforçando o concreto como material estrutural. Porém, apenas nos anos 50 e 60, inicia-se o conhecimento da utilização de fibras, para incrementar matrizes frágeis cimentíceas.

Os primeiros problemas observados foram com relação à trabalhabilidade do concreto que eram reforçadas com as fibras. Durante a mistura do concreto, foi observado que as fibras tendiam a embolar-se umas com as outras, formando novelos de fibras. Com o objetivo de mitigar esse efeito, foi tentado restringir o tamanho do agregado graúdo a ser utilizado (BALAGURU e SHAH, 1992).

Os mesmos autores ainda afirmam que com o surgimento de aditivos superplastificantes, o que resulta em uma mistura mais trabalhável, foi possível observar que fibras com gancho conseguem o mesmo resultado que fibras retas, em quantidades menores. Dessa forma, buscou-se desenvolver fibras de aço com diferentes características

e formas, resultando assim em uma utilização como um reforço secundário, em setores da construção civil como pavimentos no geral, túneis e pontes.

Nos dias atuais, é possível encontrar diversas variedades de fibras de aço para utilização como reforço em concretos. As mesmas possuem diferentes geometrias, podendo ser lisas ou ainda corrugadas, possuindo ou não ancoragem. Essas características diferentes, podem influenciar na aderência ocorrida entre a fibra e o concreto, podendo assim resultar em diferentes propriedades mecânicas. Os diâmetros podem estar na faixa entre 0,10 mm e 1,00 mm, o comprimento variando de 5 mm a 65 mm, com módulo de elasticidade de 200 GPa a 210 GPa e as tensões de ruptura podendo chegar em 2100 MPa (VELASCO, 2008).

2.2.2 Fibras de aço

De acordo com o American Concrete Institute (ACI 544.1R, 1996), as fibras de aço podem ser definidas como, comprimentos discretos de aço, sendo que existe um fator de forma (relação entre o comprimento e o seu diâmetro) na faixa de 20 a 100. Possuem também diversos formatos de seção transversal, e possuem dimensão o suficiente para serem dispersas aleatoriamente e misturadas ao concreto fresco de forma usual. Os principais objetivos dessa incorporação, é o aumento da resistência à fadiga e ao impacto, aumento da resistência à flexão e ainda pelo controle da fissuração do concreto.

Figueiredo (2011) relata que existem vários processos de fabricação que dão origem as fibras de aço. O mais usual é através do corte do arame trefilado, de aço de baixo teor de carbono. As fibras que são feitas de ligas metálicas possuem maior resistência à corrosão e são mais adequadas para uso em concretos refratários e ainda em estruturas marítimas. Entretanto, a maioria são produzidas com aço carbono ordinário.

No Brasil, a norma que regulamenta o assunto é a NBR 15530 (ASSOCIAÇÃO..., 2007), classifica com relação à geometria das fibras, em 3 tipos diferentes:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragem nas extremidades;
- Tipo C: fibra de aço corrugada;
- Tipo R: fibra de aço reta.

Além da classificação pelos diferentes tipos, a especificação brasileira divide em três classes diferentes, sendo cada classe associada ao tipo de aço que deu origem às fibras:

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio;
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio;
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

A Figura 03 apresenta a correspondência entre os tipos e as classes que foram definidas anteriormente:




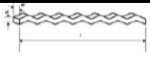


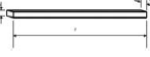
Tipo (geometria)	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Figura 03 – Classificação e geometria das fibras de aço
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

Dessa forma, é possível estabelecer classes das fibras em função da sua resistência. A Tabela 02 apresenta o nível de resistência mínima do aço com a respectiva classe da fibra, conforme estabelece NBR 15530 (ASSOCIAÇÃO..., 2007):

Tabela 02 – Requisitos especificados para cada classificação

Fibra	Resistência à tração (MPa)
AI	1000
AII	500
CI	800
CII	500
CIII	800
RI	1000
RII	500

Fonte: Adaptado NBR 15530 (ASSOCIAÇÃO..., 2007)

Ressalta-se que a determinação desses valores precisa ser feita no aço, com o diâmetro equivalente ao da fibra, imediatamente antes do corte.

Além desses fatores, a normativa também especifica um desempenho mínimo do concreto através do seu fator de forma (razão entre o comprimento da fibra e o seu comprimento). A Tabela 03 apresenta tal especificação

Tabela 03 – Requisitos do fator de forma mínimo

Classe da fibra	Tipo de aço	Fator de forma mínimo
I	Fio de aço trefilado	40
II	Chapa de aço cortada	30
III	Fio de aço trefilado e escarificado	30

Fonte: Adaptado NBR 15530 (ASSOCIAÇÃO..., 2007)

O objetivo da normativa é definir a tolerância de variação do fator de forma para que dessa forma seja minimizado variações no comportamento pós fissuração.

2.2.3 Compósito e a Interação Fibra matriz

De acordo com Figueiredo (2011), o concreto quando tem a incorporação de fibras, as mesmas dificultam que as fissuras se propaguem, pelo fato de possuir um elevado módulo de elasticidade. Assim, as fibras fazem com que haja uma redistribuição de esforços no compósito. A Figura 04 apresenta o comportamento de concreto sem e com fibras:

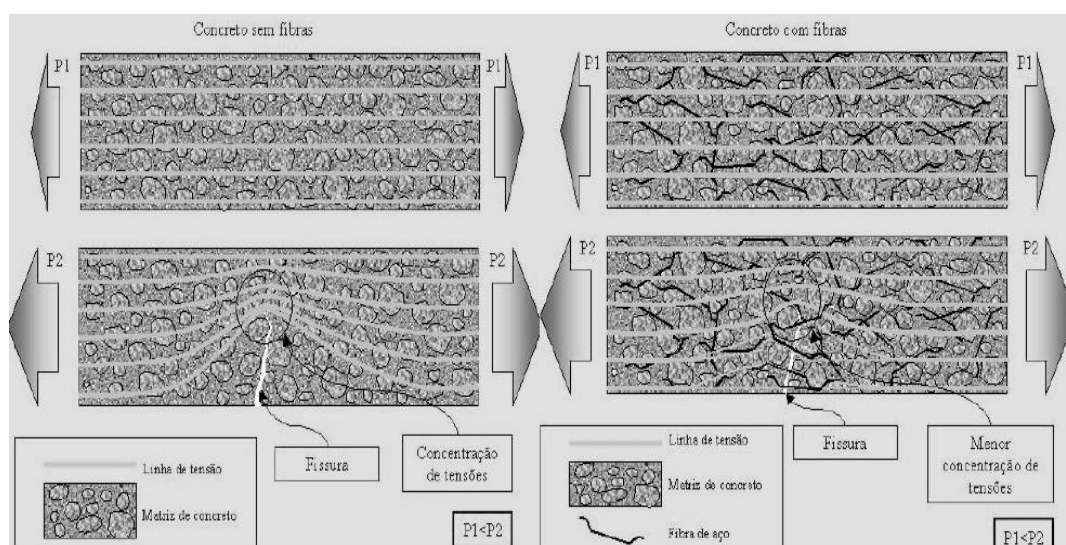


Figura 04 – Concentração de tensão para concreto sem (esquerda) e com (direita) fibras.
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

Conforme apresentado, para o concreto sem fibras, a fissura representa uma barreira para que a tensão se propague, fazendo com que assim haja uma concentração dessa tensão na extremidade da fissura, e caso o valor dessa tensão seja superior a resistência do concreto, a ruptura abrupta acontece. No caso desse esforço ser cíclico, a cada ciclo há uma pequena propagação de microfissura e conseqüentemente, também uma concentração dessa tensão na extremidade até que haja a ruptura do material pela fadiga do material (FIGUEIREDO, 2011).

O mesmo autor cita que as fibras têm um papel de ponte de transferência de tensão pelas fissuras, reduzindo assim o acúmulo dessas tensões na extremidade da fissura, como é possível observar através da Figura 04. Assim, a propagação das fissuras tem uma redução na velocidade de propagação, fazendo com que o concreto tenha um comportamento “pseudo dúctil”. Já o nível de tensão que é propagado devido as fibras, está diretamente ligado com o comprimento e teor das mesmas.

- Comprimento da fibra:

Bentur e Mindess (2007) ressaltam que aumentar sem definição o comprimento da fibra, não necessariamente acarreta em um aumento de resistência pós fissuração. Tal fato se deve ao comprimento crítico da fibra (l_c). Fator esse que está baseado em um modelo que especifica a transferência de tensão entre o concreto e a fibra, aumentando de forma linear das extremidades para o centro da fibra. O valor dessa tensão atinge o seu valor máximo quando é igualada à tensão de ruptura da fibra (σ_{fu}). Dessa forma, pode-se associar o comprimento crítico como aquele necessário para desenvolver na fibra a tensão que se iguale à sua resistência, conforme é visto na Figura 05:

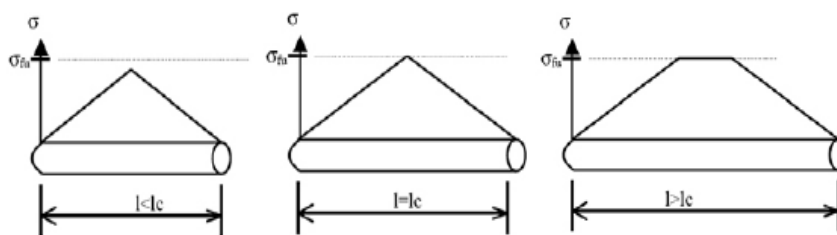


Figura 05 – Possíveis distribuições de tensão
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

Além da consideração a respeito do comprimento crítico, as fibras empregadas devem possuir compatibilidade dimensional com o agregado graúdo. Fibras que são muito compridas, afetam diretamente no concreto o estado plástico, o que conseqüentemente afeta as propriedades no estado endurecido; e fibras muito curtas,

tendem a não interceptar as fissuras. Assim é recomendado que o comprimento da fibra esteja na faixa de 1,5 a 3,0 vezes o tamanho da dimensão máxima do agregado graúdo (CHENKUI e GUOFAN, 1995).

A Figura 06 apresenta a compatibilidade dimensional das fibras, em relação ao agregado graúdo:

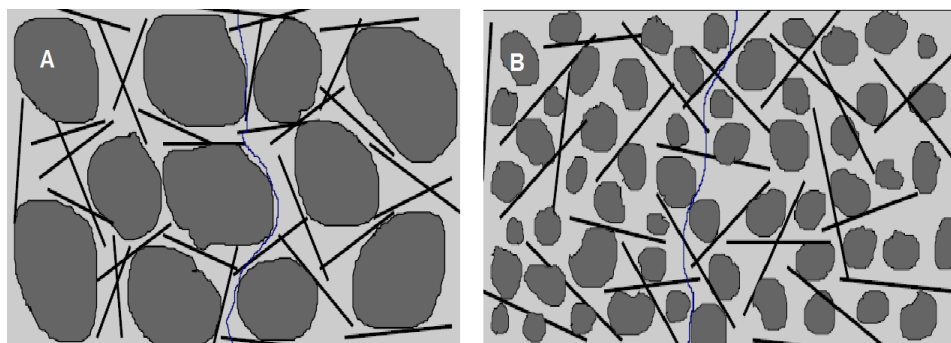


Figura 06 – A – Concreto sem compatibilidade entre as fibras; B – Com compatibilidade
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

É possível observar que não havendo a compatibilidade do tamanho da fibra, a mesma tende a não mais funcionar como sendo uma ponte de transferência de tensão na fissura.

- Teor de fibra:

O teor crítico de fibras pode ser definido como a quantidade que mantém a mesma capacidade portante do concreto, mesmo a partir da ruptura da matriz. Assim, quando se tem volumes acima do crítico, o concreto permanece aceitando níveis de carregamentos incrementais, mesmo após a ruptura fibra. Já volumes abaixo do teor crítico, no momento em que ocorre a ruptura da matriz, ocorre também uma redução na carga a qual o material tem a capacidade de suportar (FIGUEIREDO, 2011). Tal comportamento é possível observar na Figura 07:

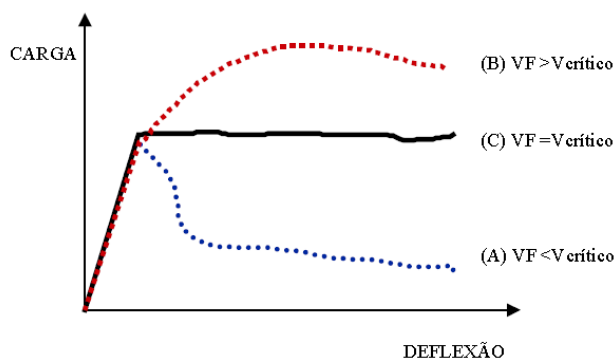


Figura 07 – Comportamento volume de fibras
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

É possível verificar um trecho inicial elástico linear que representa o estágio pré fissurado da matriz do concreto, e na sequência outro estágio parecido com um patamar de escoamento (característica de materiais dúcteis), onde é possível observar o comportamento do concreto reforçado com teores igual, abaixo e acima do teor crítico.

Aveston, Cooper e Kelly (1971) deduzem a quantidade do volume crítico de fibras, levando em consideração as características mecânicas das fibras, e obtêm um valor de 0,4% em volume para fibras de aço e em torno de 0,8% para fibras de polipropileno.

Mehta e Monteiro (2008), classificam o volume como sendo baixa fração volumétrica (menor que 1%), fração volumétrica moderada (entre 1% e 2%) e ainda em alta fração volumétrica (maior que 2%). A indicação para a baixa fração volumétrica, é para redução de fissuras por retração, e são usadas geralmente em lajes e pavimentos com superfícies grandes expostas. A fração volumétrica moderada tem a finalidade de aumento do módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto, sendo indicado ao uso em concretos projetados, e em estruturas que exigem capacidade de absorção de energia e fadiga. A alta fração, corresponde aos compósitos de alto desempenhos.

2.2.4 Propriedades no Estado Fresco

A adição das fibras proporciona o ganho de desempenho quando analisados à contenção da propagação das fissuras, quando o concreto está no estado endurecido. Entretanto, quando analisado a sua trabalhabilidade, tem as suas condições alteradas, ou seja, existe uma perda de trabalhabilidade. Tal fato se deve pelo acréscimo de superfície específica, que demanda uma maior área de molhagem, resultando assim uma menor quantidade de água para fluidificar a mistura (FIGUEIREDO, 2011).

Balaguru e Shah (1992) citam que quanto maior for o fator de forma (relação entre comprimento da fibra e o seu diâmetro), maior também será o impacto na trabalhabilidade do concreto. Assim, é possível afirmar que a adição de fibras é um fator redutor de trabalhabilidade, o que pode resultar por consequência uma compactação ineficiente, o que implica perda de durabilidade e desempenho mecânico.

De acordo com o American Concrete Institute (ACI 544.3R, 1993) é possível avaliar a trabalhabilidade do concreto convencional por três métodos diferentes. O primeiro é através do método tradicional do abatimento do tronco de cone; o segundo

pode ser realizado utilizando através de um cone invertido cujo concreto é submetido a vibração; e uma terceira forma ainda, a utilização do VeBe.

Figueiredo (2011), afirma que além da perda de trabalhabilidade, ainda considerando o estado fresco do concreto, é possível ocorrer a formação de ouriços, que são bolas formadas por fibras que ficaram aglomeradas, conforme pode ser visto na Figura 08:

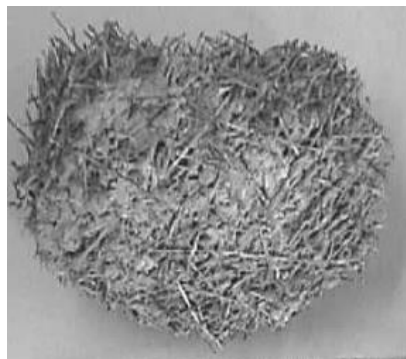


Figura 08 – Aglomerado de fibras de aço mal misturadas ao concreto
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

Caso haja a formação desse aglomerado no concreto, conseqüentemente haverá uma redução do teor distribuído de forma homogênea, assim como uma região com porosidade elevada (local onde se alojar esse aglomerado). O motivo da formação desse ouriço, se deve pela mistura inadequada do material, que não deve ser adicionado de uma só vez à betoneira, mas sim em pequenas taxas controladas.

2.2.5 Propriedades no Estado Endurecido

De acordo com Medeiros (2012), existem uma série de fatores que influenciam nas propriedades mecânicas de concretos com fibras como:

- Resistência da matriz de concreto;
- Resistência mecânica do material empregado na fabricação das fibras;
- Características geométricas das fibras;
- Volume de fibras adicionadas ao concreto;
- Orientação e distribuição das fibras dentro da matriz de concreto.
- Tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- Razão entre dimensão máxima do agregado e o comprimento da fibra.

A principal finalidade de utilizar reforços fibrosos em matrizes frágeis, como é o caso do concreto, é incrementar as propriedades mecânicas, principalmente quanto a característica de deformação. Quando incorporado fibra de aço no concreto, o seu comportamento é alterado principalmente na região pós fissuração. Algumas características das fibras como fração volumétrica, tipo e geometria, resistência e módulo de elasticidade são alguns dos fatores, que geram as mudanças nas propriedades mecânicas desse compósito (VELASCO, 2008).

2.2.5.1 Resistência à Compressão e à Tração

A finalidade de adicionar fibras no concreto, não é fazer com que a sua resistência à compressão aumente. Alguns estudos indicam uma redução nos valores encontrados para a resistência à compressão pelo fato da má compactação (em concretos convencionais) obtido com a mistura. Entretanto, demais pesquisas apontam que como as fibras atuam como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, o concreto apresentará ganho em sua resistência à compressão (FIGUEIREDO, 2011).

Araújo (2002), ensaiou à compressão concretos com fibras de aço com ancoragem, diâmetro de 0,62 mm, comprimento de 30 mm, nas quantidades de 0%, 0,75% e 1,5% em volume. Os resultados mostraram que a incorporação de fibras não resulta necessariamente um aumento na resistência à compressão, e quando há esse aumento, o valor não ultrapassa 16%.

Medeiros (2012), cita que para os volumes de fibras que são utilizados usualmente (menor que 2%), propriedades como resistência à compressão, módulo de elasticidade, tensão máxima, deformação específica relativa não é tão alterado quando comparado com o comportamento de resistência à tração e flexão. Entretanto, quando incorporado maiores teores de fibras, podem acarretar tanto em acréscimos quanto perda na resistência e no módulo. A perda associa-se ao aumento do teor de ar que é gerado pelos aglomerados de fibras.

O American Concrete Institute (ACI 544.1R, 1996), apresenta que a incorporação de fibras de aço no concreto resulta em um aumento de 0 e 15% na resistência à compressão, para frações volumétricas que estejam acima de 1,5%. Porém, com relação ao esforço de tração, as fibras aumentam a sua resistência de forma mais significativa, estando na faixa de 30 e 40% para adições com um teor de 1,5%.

Figueiredo (2011) cita que o aumento da resistência à tração por compressão diametral gerado pelas fibras, vai variar conforme o comprimento das fibras e a dimensão máxima do adregado graúdo. Essa variação pode ser compreendida na faixa de 60% até 130% de ganho de resistência à tração utilizando o ensaio de compressão diametral, dependendo o teor incorporado.

No geral, as fibras de aço proporcionam também um aumento na resistência do material ao cisalhamento. Esse aumento tem se mostrado dependente da forma de ensaio empregada e ainda do alinhamento das fibras na região de ruptura por cisalhamento. É possível obter um aumento de 30% na resistência ao cisalhamento para um teor de 1% de acréscimo de fibras (ACI 544.1R, 1996).

Lopes (2005), afirma que diversos fatores podem intervir nas propriedades mecânicas dos concretos que possuem fibras de aço. Os principais citados são o comprimento das fibras, interação fibra/matriz, orientação e o volume das fibras adicionadas.

2.2.5.2 Comportamento à fadiga do concreto

De acordo com a NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014), a fadiga se caracteriza como um fenômeno associado a repetidas ações dinâmicas, sendo um processo de modificações permanentes e progressivas da estrutura interna de um material submetido a oscilação de tensões provenientes dessas ações.

Devido ao fato das fibras de aço atuarem como ponte de transferência de tensão, existe uma redução na propagação das fissuras, resultando assim um concreto resistente a um maior número de cargas cíclicas. Dessa forma, quando utilizado fibras, o concreto continua se mostrando portante, mesmo quando fissurado, devido ao seu comportamento “pseudo dúctil” (FIGUEIREDO, 2011).

Medeiros (2012), afirma que o desempenho do concreto com fibras quando submetido à tração ou flexão tem um aumento imediato e notório. Entretanto quando analisado a compressão, essa melhoria não é tão impactante. Em sua pesquisa, onde foi determinada a resistência à fadiga em compressão (para diferentes frequências), para concretos sem fibras, e uma frequência de 4 Hz, foi encontrado valores de 133 a 170256 ciclos, frequência de 1 Hz valores entre 23 e 1571 ciclos, frequência de 0,25 Hz valores entre 18 1242 ciclos, e para uma frequência de 0,0625 Hz valores entre 11 473 ciclos. Entretanto, quando incorporado fibras de aço, para as mesmas frequências, foram

encontrados os valores respectivamente de 849 a 5952 ciclos, 154 e 7438 ciclos, 237 e 5541 ciclos, 221 e 2409 ciclos. Ou seja, é possível observar que o desempenho da adição de fibras, teve melhor desempenho à baixas frequências.

Naaman e Hammond (1998), empregaram em seus estudos experimentais fibras de aço com ancoragem, um volume de 2% e fator de forma de 60, sendo que resultou em quase 3×10^6 ciclos até a ruptura, sendo que as tensões foram variadas de 10% a 70% da carga estática. Entretanto, segundo Li e Matsumoto (1998), não é necessário que sejam incorporados grandes teores de fibras, sendo que pequenas quantidades adicionadas já melhoram a propriedade com relação à fadiga.

2.2.6 Dosagem de concretos com fibras

Para que haja a viabilidade econômica do concreto reforçado com fibras, deve-se dosar de uma forma que seja otimizado o consumo de fibras, ou seja, definir o mínimo consumo necessário para que sejam atendidas as exigências de desempenho. Deve-se ressaltar que a viabilidade econômica do concreto reforçado com fibras, não se pode basear única e exclusivamente no seu custo unitário, mas sim no custo global como um todo que pode ser proporcionado (FIGUEIREDO, 2011).

O concreto reforçado com fibras, é especificado de acordo com o ACI 544, pelo teor e pela sua resistência. Geralmente a resistência à compressão é especificada para aplicações estruturais, enquanto que a resistência à flexão é especificada para aplicar em pavimentos. Usualmente é especificado resistência à compressão de 34 a 48 MPa aos 28 dias e resistência à flexão de 5 a 7 MPa para a mesma idade. Os extremos máximos usuais são de 1,2% a 1,5% em volume, porém podem ser especificados também teores baixos de 0,38% e altos de até 2,8%.

Dependendo a aplicação do concreto, deve ser feita a escolha da fibra. Caso o concreto seja projetado, existe uma consideração quanto ao tamanho da fibra, uma vez que o concreto deverá passar por tubulação. Já para o caso de concreto convencional, um melhor desempenho pode ser associado a um aumento do comprimento da fibra. Figueiredo, Ceccato e Torneri (1997) fizeram uma comparação entre o desempenho de fibras (ancoradas) que possuíam comprimentos diferentes, porém seções transversais iguais, e foi obtido um ganho de 57,5% para a fibra de maior comprimento.

Figueiredo (2011), apresenta que é possível correlacionar a carga aplicada, com a deflexão gerada para diferentes teores de fibras, conforme mostra a Figura 09:

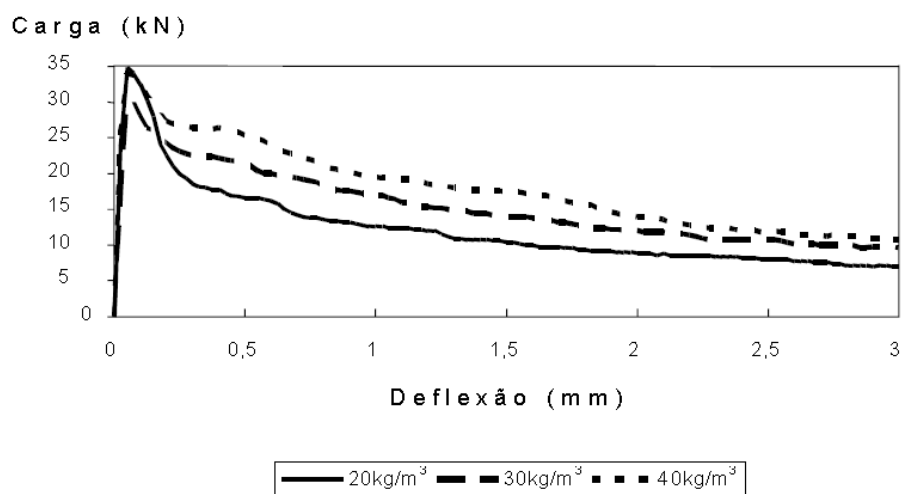


Figura 09 – Curvas para concretos com $f_{ck}=20\text{MPa}$ com diferentes teores de fibras
Fonte: Adaptado de Figueiredo, 2011.

Analisando e comparando a deflexão com a carga aplicada para os diferentes teores, é possível observar que para uma mesma deformação, quanto maior o teor de fibras, maior será a necessidade de aplicação de carga, ou seja, quanto maior o teor de fibras, maior capacidade portante para o composto.

Helene e Terzian (1992), citam que para dosar um concreto reforçado com fibras, é necessário levar em consideração as propriedades da matriz do concreto, tipo de fibra, exigências e desempenho do concreto tanto no estado fresco (trabalhabilidade), quanto no estado endurecido (resistência à tração, flexão, compressão, etc).

2.2.7 Aplicações

O ACI 544 3R (1993) especifica que as fibras de aço estão sendo utilizadas tanto em usos não estruturais quanto em usos estruturais. Esses usos podem ser observados em pavimentos de aeroportos e rodovias, fundações de máquinas, pisos industriais, estruturas hidráulicas (barragens, vertedouros e para resistir a cavitação), concretos refratários, revestimento de túneis e minas, pisos de pontes, revestimento para estabilização de taludes em rodovias e ferrovias dentre outras.

Mehta e Monteiro (2008) citam que a primeira aplicação estrutural que o concreto reforçado com fibras teve foi na produção de painéis desmontáveis de 3250 mm^2 com 65 mm de espessura, em Londres, no ano de 1971, para utilizar em um estacionamento do aeroporto Heathrow. O concreto em questão teve a incorporação de

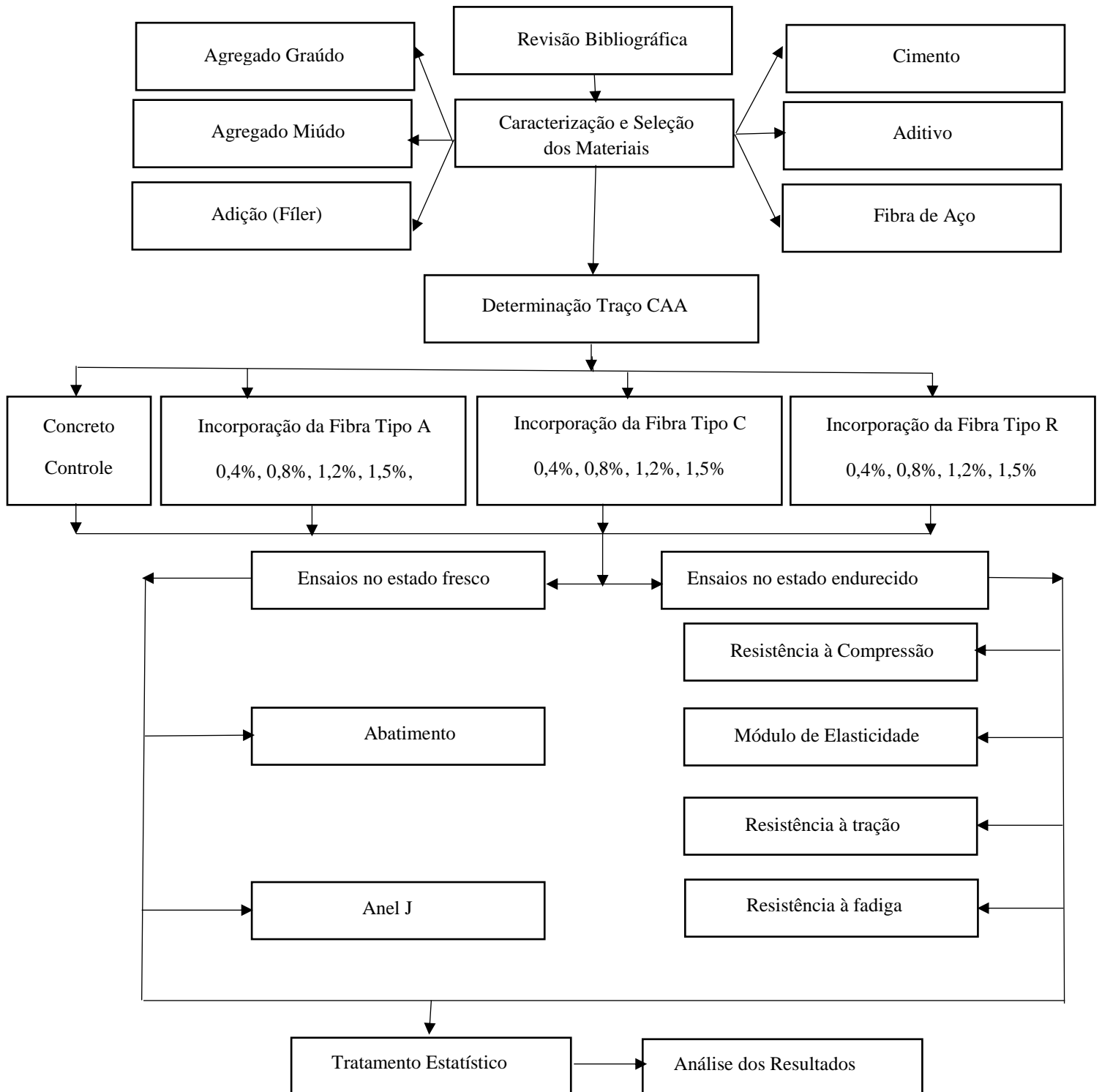
fibras de aço estiradas a frio de 25 mm de comprimento e 0,25 mm de diâmetro, em uma proporção de 3% em massa. Após 5 anos de uso, foi realizada uma inspeção, e não foi detectado nenhum sinal de fissura.

Os autores ainda afirmam também, que nesse mesmo ano de 1971, o U. S. Army Construction Engineering Research Laboratory realizou experimentos em um concreto reforçado com fibras (proporção em volume de 2%) em lajes que são utilizadas para decolagem em Vicksburg, Missisipi. O experimento consistiu em submeter a pista de decolagem a um carregamento gerado pelas 12 rodas da aeronave C5A (13,6 toneladas por roda). A comparação foi realizada entre uma laje de concreto reforçadas com fibras de 150 mm de espessura com uma laje de concreto simples de 250 mm de espessura. Enquanto que a laje de concreto com fibras necessitou de 350 carregamentos para fissurar, a de concreto convencional precisou de apenas 40. Da mesma forma, o concreto simples foi julgado destruído com 950 carregamento, sendo que o concreto reforçado com fibras após 8735 carregamentos, se mostrou em condições de uso, mesmo com as fissuras apresentadas.

Segundo Figueiredo (2011) as principais aplicações do concreto com fibras são em pavimentos, revestimento de túneis e tubos de concreto para obras de saneamento. Como principal vantagem de uso desse concreto para pavimentos, se tem a eliminação da colocação de armadura o que acarreta em um número menor de funcionários e um tempo reduzido para a execução. De forma análoga, existe uma redução do tempo de execução de túneis, uma vez que é eliminada a colocação de tela metálica. Como tendência de utilização futura, é possível destacar o caso de estruturas submetidas a esforços de fadiga ou ainda a abalos sísmicos.

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com a finalidade de estudar a influência de diferentes tipos de fibras de aço nas propriedades do CAA nos estados plástico e endurecido, as seguintes etapas foram seguidas, como mostra o fluxograma:



Primeiramente o estudo foi baseado na caracterização dos agregados os quais compuseram o concreto. Na sequência o traço do concreto autoadensável de referência foi determinado com base no método de Gomes. Tendo obtido o traço do concreto de referência (sem fibras), outras 12 misturas foram confeccionadas. Dentre essas misturas a divisão foi feita entre 3 tipos de fibras (reta, ondulada e ancorada) e para cada tipo foi variado a quantidade de fibras em 4 teores (0,4%; 0,8%; 1,2% e 1,5%) totalizando assim as demais 12 misturas para que fosse possível entender o comportamento do concreto quando adicionado diferentes tipos de fibras, com diferentes teores. Para cada uma das misturas, foram feitos ensaios tanto no estado fresco do concreto quanto no estado endurecido. No estado fresco foram realizados os ensaios de slump e anel J (NBR 15823-3), enquanto que no estado endurecido foram realizados ensaios de resistência à compressão axial (NBR 5739), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222), módulo de elasticidade (NBR 8522) e também resistência à fadiga. Ao final, com os resultados de todos os ensaios realizados, os dados foram tratados estatisticamente, por meio da ANOVA: fator duplo com repetição e posteriormente, teste Tukey quando necessário.

3.1 Materiais

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o CP-V ARI, por ser um cimento de elevada superfície específica, o qual propicia redução da segregação no concreto autoadensável. O ensaio de massa específica foi realizado conforme NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO..., 2001), enquanto que o ensaio de superfície específica (blaine) foi determinado com base na NBR 16372 (ASSOCIAÇÃO..., 2015). Os dados de pega foi fornecido pelo fabricante. A Tabela 04 apresenta as características do cimento empregado na pesquisa:

Tabela 04 – Características CP – V ARI

Tempo Início Pega (h)	Massa Esp. Absoluta (g/cm ³)	Superfície Específica (cm ² /g)
1,0	3,09	4282,0

Fonte: Autor (2016).

3.1.2 Água

A água empregada na produção do concreto foi proveniente do sistema de distribuição pública de água da concessionária local (SANEPAR). De acordo com a NBR 15900 (ASSOCIAÇÃO..., 2009), este tipo de água pode ser utilizada sem restrição para produção de concreto e argamassa.

3.1.3 Agregados

3.1.3.1 Agregado Miúdo

No Apêndice A é apresentado o resultado do ensaio granulométrico do agregado miúdo, apresentando a quantidade de massa e a porcentagem retida em cada peneira. Apresenta a variação entre as porcentagens retidas, para que dessa forma fosse possível verificar se é necessário ou não realizar o ensaio novamente, assim como a média das porcentagens retidas das amostras, além ainda da porcentagem retida acumulada.

Através do ensaio granulométrico foi possível obter curvas, e assim comparar e avaliar porcentagens retidas acumuladas para um agregado em específico. Uma das finalidades desse ensaio é verificar se o agregado se encaixa em limites estabelecidos pela norma. A Figura 10 apresenta a distribuição granulométrica do agregado miúdo, a qual enquadrou-se entre os limites superior e inferior da zona utilizável cuja NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO..., 2003) estabelece.

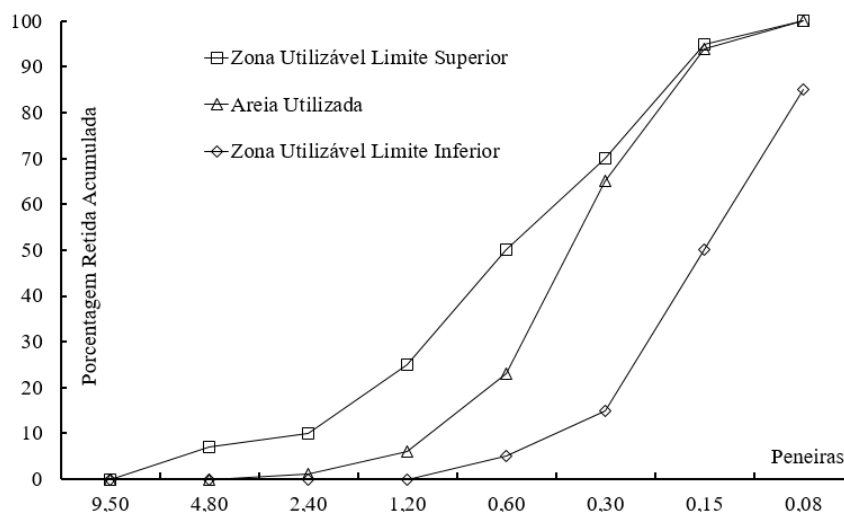


Figura 10 – Curva granulométrica do agregado miúdo

Fonte: Autor, 2016.

Dessa forma, baseando-se nos valores referenciados, foi possível obter os valores de módulo de finura e dimensão máxima característica. O módulo de finura é a soma das porcentagens retidas acumuladas dividindo-se o valor por 100; sendo que para o agregado em questão esse valor foi de 1,92. Já a dimensão máxima característica representa a abertura da peneira com maior dimensão que retenha uma porcentagem acumulada igual ou inferior a 5%, ou seja, para a areia utilizada foi de 2,40 mm.

Uma vez que a quantidade de material pulverulento é limitada pela NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO..., 2009) em concretos, a determinação da quantidade de material pulverulento foi necessária, e o ensaio foi baseado na NBR NM 46 (ASSOCIAÇÃO...,2003), assim como mostra a Figura 11:



Figura 11 – Determinação do material pulverulento do agregado miúdo
Fonte: Autor, 2016.

A Tabela 05 apresenta a porcentagem de material pulverulento presente na areia empregada na pesquisa:

Tabela 05 – Porcentagem de material pulverulento no agregado

Amostra	m1 (g)	m2 (g)	% finos	% média finos
1	600,07	593,28	1,13	1,34
2	600,58	591,30	1,55	

Fonte: Autor, 2016.

A massa específica aparente do agregado foi determinada com base NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO..., 2009), a qual se caracteriza por um recipiente de vidro que possui

uma tampa com um tubo capilar, que quando está totalmente repleto por água, apresenta um volume de forma definida e com precisão. A Tabela 06 expressa os valores obtidos:

Tabela 06 – Valores da massa específica aparente da areia

Amostra	m1 (g)	m2 (g)	m3 (g)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Massa Específica Aparente Média (g/cm ³)
1	50,34	654,59	686,10	2,67	
2	75,30	654,59	701,35	2,64	2,66
3	105,51	654,59	720,38	2,66	

Fonte: Autor, 2016.

De acordo com a Tabela 06, m1 representa a massa de areia, m2 a massa do picnômetro com água e m3 a massa da areia com o picnômetro e água. Dessa forma a massa específica pode ser obtida pela razão entre massa da areia e o seu volume, sendo que o volume é encontrado por $(m2 - (m3 - m1))$.

Com base na caracterização realizada, o presente agregado se encaixa dentro da zona utilizável, apresentando módulo de finura 1,90 e dimensão máxima característica 2,40 mm; a quantidade de material pulverulento está de acordo com a normativa (1,34% considerando o valor máximo de 5%); e uma massa específica aparente média de 2,66g/cm³.

3.1.3.2 Agregado Graúdo

A brita utilizada é de origem basáltica, e de maneira análoga ao ensaio granulométrico realizado para o agregado miúdo, procedeu-se ao agregado graúdo. O Apêndice B mostra o ensaio granulométrico realizado para brita, apresentando a quantidade de massa e porcentagem retida em cada peneira, a variação entre as porcentagens retidas (para assim verificar se há a necessidade de se realizar novamente o ensaio), além da porcentagem retida acumulada.

O agregado graúdo utilizado na dosagem, apresenta dimensão máxima característica (abertura a qual retém uma porcentagem acumulada igual ou inferior a 5%) de 9,50 mm. Esse agregado pode ser classificado comercialmente como sendo brita zero.

Para obtenção da massa específica aparente do agregado graúdo, utilizou-se o processo da balança hidrostática (NBR 9937, 1987). O processo consistiu na aferição da massa da brita seca, e da massa da brita submersa. Assim, o volume corresponde à

diferença da massa seca pela massa submersa (empuxo que é igual a massa do volume de água). Dessa forma, com massa e volume conhecidos, foi possível determinar a massa específica aparente do agregado graúdo, conforme mostram a Figura 12 e a Tabela 07:



Figura 12 – Determinação da massa específica aparente da brita
Fonte: Autor, 2016.

Tabela 07 – Valores da massa específica aparente da brita

Amostra	Massa (g)	Massa submersa (g)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Massa Específica Aparente Média (g/cm ³)
1	460,20	297,00	2,82	
2	302,48	196,35	2,85	2,85
3	527,62	344,42	2,88	

Fonte: Autor, 2016.

Através da análise granulométrica realizada, pode-se concluir que o agregado graúdo se classifica com uma dimensão máxima característica de 9,50 mm, e uma massa específica aparente média de 2,85g/cm³.

3.1.4 Fíler Calcário

A resistência à segregação de um concreto autoadensável é decorrente das adições a qual está diretamente ligada com a sua finura. A caracterização da adição utilizada no presente estudo, baseia-se em sua massa específica aparente, e em sua superfície específica (finura).

A massa específica aparente do fíler calcário foi determinada da mesma forma a qual foi determinada a do agregado miúdo, utilizando o método do picnômetro (NBR NM

23), descrito anteriormente. A Tabela 08 apresenta os resultados de massa específica aparente dessa adição:

Tabela 08 – Valores da massa específica do fíler calcário

Amostra	m1 (g)	m2 (g)	m3 (g)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Massa Específica Aparente Média (g/cm ³)
1	50,61	654,59	686,62	2,72	
2	40,58	654,59	680,34	2,74	2,75
3	36,72	654,59	678,08	2,78	

Fonte: Autor, 2016

Com relação a superfície específica, o ensaio foi realizado com base na NBR 16372 (ASSOCIAÇÃO..., 2015), a qual determina a finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). O ensaio baseia-se no tempo requerido para uma quantidade de ar fluir através da amostra (a quantidade de material ensaiada é em função da sua massa específica aparente) compactada sob condições específicas, na constante do aparelho e na viscosidade do ar. A Tabela 09 apresenta os resultados obtidos para o ensaio de finura:

Tabela 09 – Valores da superfície específica do fíler

Amostra	Tempos (s)	Superfície Específica (cm ² /g)	Média (cm ² /g)
1	36,50	4.424,73	4.445,85
2	36,72	4.466,96	

Fonte: Autor, 2016.

Através dos ensaios realizados, pode-se constatar que o fíler calcário apresenta-se como um material fino, sendo a sua superfície específica superior à do cimento empregado na pesquisa (4.282,0 cm²/g), Tal característica recomendada para sua aplicação como adição mineral em concretos autoadensáveis.

3.1.5 Fibra de Aço

As fibras podem ser classificadas, de acordo com a NBR 15530 (ASSOCIAÇÃO..., 2007), conforme o processo de produção e forma. As fibras empregadas para o estudo são provenientes de chapas laminadas cortadas a frio (Classe

II) com diferentes conformações geométricas. A Tabela 10 apresenta as características das fibras utilizadas:

Tabela 10 – Características das fibras de aço utilizadas

Conformação Geométrica	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Fator Forma	Módulo Elasticidade	Resistência à tração
Ancorada (A)	30,0	0,55	55		
Corrugada (C)	30,0	0,55	55	210 GPa	>1100 MPa
Reta (R)	25,0	0,5	50		

Fonte: Autor, 2016.

Para analisar o efeito da conformação geométrica nas propriedades do concreto autoadensável no estado plástico e endurecido, foram produzidos concretos com as três configurações geométricas disponíveis, isto é, ancorada, corrugada e reta (A, C e R), variando os teores das mesmas em 0,4%; 0,8%; 1,2% e 1,5% (teores esses com base no teor máximo especificado por norma de 2,0%), totalizando assim 12 misturas.

3.1.6 Aditivo Superplastificante

Para a dosagem de concretos autoadensáveis é indispensável a utilização de aditivos para assim conseguir a característica de alta fluidez. O aditivo utilizado na pesquisa foi o Tec Flow 7030, um redutor de água superplastificante de 3ª geração, isento de cloretos. O fabricante apresenta sua massa específica (NBR 10908) como sendo entre 1,04 e 1,08 g/cm³ e recomenda uma dosagem variando de 0,6 a 2,0%. De acordo com a NBR 11768 (ASSOCIAÇÃO..., 2011) é um aditivo do Tipo SP II / N/A/R.

3.2 Métodos

O capítulo em questão tem por objetivo detalhar os diversos ensaios experimentais realizados para a produção do concreto, bem como as avaliações de suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

O concreto autoadensável produzido na pesquisa foi dosado com base no método de Gomes, o qual considera esqueleto granular e pasta de cimento, sendo que são obtidos e trabalhados de forma independente.

3.2.1 Dosagem do Concreto Autoadensável

3.2.1.1 Otimização da pasta

Para a análise realizada na pasta, foi fixada a relação água/cimento, e definidos os teores de aditivo superplastificante e de adição mineral (fíler) necessários para que tal pasta tivesse o comportamento característico desejado.

A relação água/cimento foi baseada na mistura de pasta (sem aditivo superplastificante), de forma que fosse obtida uma mistura fluida o suficiente para escoar através do cone de Marsh.

Fixada a relação a/c em 0,45 foi determinada a quantidade de aditivo, através do ponto de saturação (através do escoamento no cone de Marsh e do espalhamento do *mini slump* no tronco de cone). O mesmo é alcançado quando, mesmo acrescentando maiores teores de aditivo à pasta, não diminui o tempo de escoamento e nem aumenta o diâmetro de espalhamento. Dessa forma, o ponto de saturação se caracteriza por aquele que obtém os melhores índices, na menor quantidade de aditivo possível.

Inicialmente utilizou-se uma quantia de 0,1% de aditivo da massa de cimento e na sequência eram acrescentados 0,02% da mesma massa inicial. Com o objeto de padronizar todas as misturas, as etapas se deram todas da mesma forma.

O ensaio de escoamento, o qual foi realizado utilizando o cone de Marsh, caracteriza-se no tempo necessário para escoar 200 ml de pasta, de uma quantia total de 800ml inicialmente adicionados ao cone. Devido ao fato de ser um ensaio que requeria precisão, além de utilizar uma proveta graduada, o ensaio foi filmado para que o tempo pudesse ser determinado com a maior precisão possível.

O ensaio utilizando o *mini slump*, caracteriza-se por preencher um tronco de cone até a borda com pasta, sobre uma superfície completamente plana e uniforme, sem haver qualquer forma de adensamento da pasta. Na sequência o tronco de cone é levantado de forma cuidadosa para que a pasta flua de forma homogênea, para então ser aferido o espalhamento da mistura. Além dessa medida, também foram analisadas a exsudação e segregação da pasta. Caso a pasta exsudasse ou segregasse era adicionado fíler de 5 em 5%.

Com o valor do ponto de saturação de aditivo definido em 0,2%, deu-se início a correção da coesão da pasta, adicionando o fíler calcário, com o objetivo de reduzir tanto a exsudação quanto a segregação.

Nesta etapa, foi iniciada adicionando 5% de fíler em relação a massa de cimento e então verificado se havia ou não exsudação e/ou segregação (para adição não foi aferido o tempo no cone de Marsh). A medida que foi necessário, acrescia-se 5% de adição em relação à massa inicial de cimento, sendo novamente averiguados o comportamento quanto a exsudação e/ou segregação. No caso do espalhamento ter valor inferior aos 600 mm com o acréscimo de adição, acrescia novamente o aditivo em 0,05%. A Tabela 11 apresenta como se deu o comportamento das misturas:

Tabela 11 – Dosagem pasta de cimento

Aditivo (%)	Adição (%)	Espalhamento (mm)	Tempo (s)
0,10	-	305	7
0,12	-	367	7
0,14	-	452	5
0,16	-	483	5
0,18	-	540	4
0,20	-	610	3
0,22	-	610	3
0,22	-	610	3
0,20	5	607	-
0,20	10	582	-
0,22	10	590	-
0,24	10	613	-
0,24	15	588	-
0,26	15	595	-
0,28	15	608	-
0,28	20	596	-
0,30	20	605	-

Fonte: Autor, 2016.

Para a pasta estudada, foi necessário empregar 0,30% de aditivo superplastificante para que a mistura obtivesse a fluidez necessária, e 20% de fíler calcário para que a mesma não exsudasse.

3.2.1.2 Esqueleto Granular

A combinação de agregados miúdo e graúdo que compõe o concreto, pode ser entendida como esqueleto granular. Para se determinar a proporção entre os agregados, é necessário avaliar a densidade da mistura com o menor teor de vazios.

O esqueleto granular foi obtido experimentalmente, analisando-se a massa unitária e o teor de vazios. O procedimento em si consistiu em misturar manualmente os agregados miúdo e gráudo em um recipiente (de forma que tal mistura ficasse homogênea) e colocá-los em um molde de corpo de prova, com volume conhecido de 1,57 l, e determinar a massa unitária. O procedimento repetiu-se de forma que fosse variado de 0 a 100% tanto para a areia quanto para a brita (de 10% em 10%), conforme mostra a Tabela 12:

Tabela 12 – Determinação esqueleto granular

Proporção entre Areia(A) e brita (B)	Massa específica (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
100% (A)	2660,00	1669,15	37,3
90% (A) 10% (B)	2670,00	1759,63	34,1
80% (A) 20% (B)	2680,00	1830,88	31,7
70% (A) 30% (B)	2690,00	1894,00	29,6
60% (A) 40% (B)	2700,00	1920,75	28,9
50% (A) 50% (B)	2710,00	2008,75	25,9
40% (A) 60% (B)	2720,00	1960,63	27,9
30% (A) 70% (B)	2730,00	1961,38	28,2
20% (A) 80% (B)	2740,00	1886,63	31,1
10% (A) 90% (B)	2750,00	1774,13	35,5
100% (B)	2760,00	1660,63	39,8

Fonte: Autor, 2016.

Para cada proporção foi determinado a massa unitária e o volume de vazios de forma prática, e a massa específica da mistura de forma teórica. Para o cálculo da massa específica, foi considerado a proporção de cada material, conforme abaixo:

$$M_{espAB} = \frac{(M_{espA} * \%A) + (M_{espB} * \%B)}{100}$$

Onde

M_{espAB} : Massa específica da mistura entre areia e brita;

M_{espA} : Massa específica areia;

M_{espB} : Massa específica brita;

%A: porcentagem de areia presente na mistura;

%B: porcentagem de brita presente na mistura.

A massa unitária foi determinada através da razão da massa da mistura colocada no corpo de prova pelo seu volume. Dessa forma com os valores de massa unitária e específica foi possível determinar o volume de vazios (%) conforme:

$$V = \frac{M_{espAB} - M_{uniAB}}{M_{espAB}} * 100$$

Onde M_{espAB} é a massa específica determinada anteriormente e M_{uniAB} é a massa unitária da mistura. Assim, com valores de massa unitária (kg/m^3) e volume de vazios (%) é possível chegar a Figura 13:

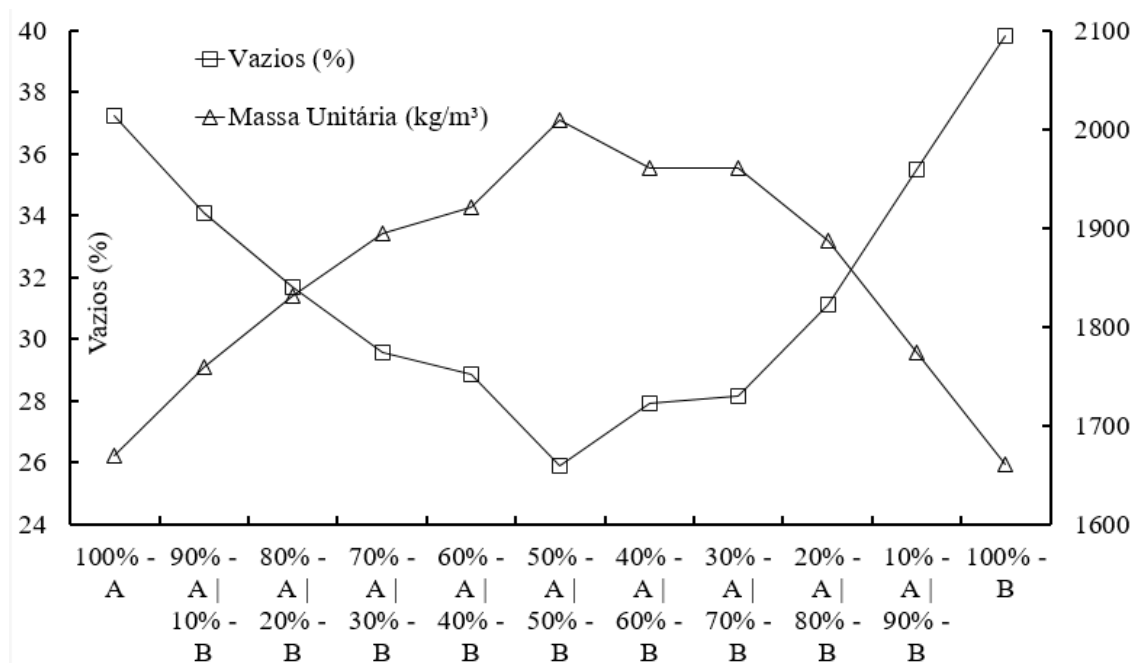


Figura 13 – Teor de vazios e peso específico de cada mistura

Fonte: Autor, 2016.

Analisando as curvas de massa específica e de volume de vazios, percebe-se que com a proporção 50% de areia e 50% de brita obtém-se o menor volume de vazios e a maior massa unitária, sendo assim tal proporção indicada para a mistura do concreto autoadensável. Porém, como para o presente estudo, houvera a incorporação de fibras de aço ao concreto, foi necessário um teor de argamassa alto, ou seja, maior proporção de areia do que brita nesse esqueleto, adotando-se assim a proporção de 55% de areia e 45% de brita para a confecção do concreto.

3.2.1.3 Concreto autoadensável

Determinadas as etapas de pasta e de esqueleto granular, foi iniciado o processo de determinação do traço do concreto de controle. Para tal, iniciou-se com 0,30% de aditivo, 20% de fíler calcário, conforme determinado em 3.2.1.1 e a proporção de esqueleto de 55% de areia e 45% de brita conforme especificado em 3.2.1.2. Ao ser confeccionado esse traço, foi necessário o incremento tanto de aditivo quanto de adição para que assim o concreto obtivesse as características de alta fluidez, coesão e resistência à segregação. Para incorporação de aditivo, foi incrementado porções de 0,20% (até uma quantia total de 1,25%), enquanto que para o fíler, foi necessária apenas uma adição de 5%, totalizando assim uma quantia final de 25%, resultando em um espalhamento de 850mm, conforme mostra a Figura 14:



Figura 14 – Slump flow do concreto de controle
Fonte: Autor, 2016.

Como o traço do concreto de controle obteve as características necessárias para se enquadrar como autoadensável, padronizou-se o traço conforme a Tabela 13:

	Cimento	Fíler	Areia	Brita	Água	Aditivo	Teor de argamassa
(kg/m ³)	439,53	109,88	923,01	747,20	197,79	5,49	66,33
Unitário	1	0,25	2,1	1,7	0,45	0,0125	

Fonte: Autor, 2016.

Dessa forma, todas as demais misturas de concreto foram confeccionadas com o traço de 1:0,25:2,1:1,7:0,45:0,0125, com a diferença que para os demais traços, houve a incorporação das fibras de aço.

Com o objetivo de padronizar o processo de mistura do concreto, os materiais foram adicionados conforme Velasco (2008) da seguinte forma:

- Imprimação da betoneira para que assim não houve perda de argamassa para a mesma;
- O agregado graúdo juntamente com 80% da quantia de água eram colocados e misturados por 30 segundos;
- Com a betoneira desligada, acrescentava o cimento e ligava novamente a betoneira por mais 30 segundos;
- Na sequência, também com a betoneira desligada, acrescia-se o fíler calcário e misturava novamente por 30 segundos;
- Depois, acrescentava-se a areia e dessa vez a betoneira ligada por 3 minutos;
- Com a betoneira desligada, fazia-se a raspagem das pás e da parede da mesma em um tempo de 60 segundos;
- Ainda com a mesma desligada, acrescentava-se o restante da água juntamente com o aditivo para assim ligar por mais 7 minutos.

O concreto foi produzido em betoneira de eixo inclinado, no canteiro de obras da UTFPR, e após a mistura foram realizados os ensaios no seu estado fresco, que serão descritos a seguir, e posteriormente moldados 18 corpos de prova cilíndricos 10x20 cm conforme especifica a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO..., 2015), sendo 9 corpos para os ensaios no estado endurecido para 7 dias e os demais 9 para a idade de 28 dias.

Após moldados, os mesmos ficaram armazenados em uma câmara climatizada com temperatura de 23°C e umidade relativa em torno de 60% (por não se possível o ideal de > 95%), sendo desmoldados 24 horas após moldagem, onde permaneciam nessa mesma câmara até que a idade correspondente a cada ensaio fosse atingida.

3.2.2 Incorporação de Fibras de Aço ao Concreto

Com exceção do concreto de controle, todas as 12 demais misturas continham fibras de aço incorporadas ao concreto. Essa incorporação foi realizada após todo o processo de adição dos materiais, descrito anteriormente em 3.2.1.3, e um tempo de mistura pós adição das fibras de 3 minutos.

Foram utilizados 3 tipos de fibras (ancorada, corrugada e reta), e para cada uma delas variado os teores em 0,4%; 0,8%; 1,2% e 1,5%; teores esses escolhidos com base no teor máximo definido pelas normativas, assim como para se ter um intervalo maior dessa variação de porcentagem utilizada. Dessa forma as misturas de concreto se dividiram da seguinte forma:

- C0 – mistura de concreto de controle (0% de adição de fibra);
- CA1,5 – mistura com 1,5% de adição de fibra tipo ancorada;
- CC1,5 – mistura com 1,5% de adição de fibra tipo corrugada;
- CR1,5 – mistura com 1,5% de adição de fibra tipo reta;
- CA1,2 – mistura com 1,2% de adição de fibra tipo ancorada;
- CC1,2 – mistura com 1,2% de adição de fibra tipo corrugada;
- CR1,2 – mistura com 1,2% de adição de fibra tipo reta;
- CA0,8 – mistura com 0,8% de adição de fibra tipo ancorada;
- CC0,8 – mistura com 0,8% de adição de fibra tipo corrugada;
- CR0,8 – mistura com 0,8% de adição de fibra tipo reta;
- CA0,4 – mistura com 0,4% de adição de fibra tipo ancorada;
- CC0,4 – mistura com 0,4% de adição de fibra tipo corrugada;
- CR0,4 – mistura com 0,4% de adição de fibra tipo reta.

Todas as 13 misturas, seguiram os mesmos processos de dosagem, cura, e execução dos ensaios.

3.2.3 Ensaio no estado fresco do concreto

O concreto autoadensável quando no estado endurecido, possui suas características semelhantes às do concreto convencional. Porém, em seu estado fresco, essas características são divergentes, sendo assim necessários alguns ensaios para aceitação, conforme especifica NBR 15823-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). O item 6.2.1 dessa norma remete que devem ser analisadas a fluidez e viscosidade plástica aparente, avaliadas pelo ensaio de espalhamento e t_{500} previstos na NBR 15823-2 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) e a habilidade passante, a qual é avaliada pelo ensaio utilizando o anel J, de acordo com a NBR 15823-3 (ASSOCIAÇÃO..., 2010).

3.2.3.1 Ensaio de espalhamento e t_{500}

A capacidade do concreto autoadensável de fluir livremente sem segregar pode ser medida pelo ensaio de espalhamento. O ensaio é composto por um tronco de cone (diâmetro maior de 200 mm, diâmetro menor de 100 mm e altura de 300 mm) e por uma base que não absorva água e não provoque o atrito com o concreto com dimensão 1 metro por 1 metro. É necessário também, para o ensaio, uma espátula, uma concha e uma trena para medir o espalhamento do concreto.

Inicialmente são umedecidos o tronco de cone e a base para que não absorvam água do concreto. Em seguida é colocada a base sobre o chão nivelado e o tronco de cone no centro da base sendo segurado firmemente, centrando-o na marcação circular de diâmetro de 200 mm, conforme a Figura 15:

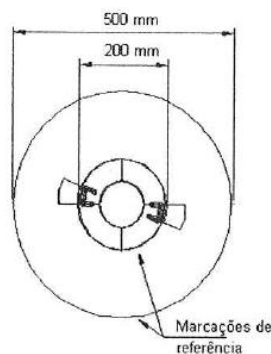


Figura 15 – Vista em planta do posicionamento do molde
Fonte: NBR 15823-2, 2010.

Na sequência a amostra é coletada conforme a NBR NM 33 (ASSOCIAÇÃO..., 1998), não ultrapassando o tempo de 2 minutos após a coleta. Com auxílio da concha preenchia-se o tronco de cone com o concreto e com a espátula removia-se o excesso. O adensamento deu-se única e exclusivamente através da força da gravidade.

Na sequência, a desmoldagem efetuada se dava pelo levantamento cuidadoso do molde pelas alças, no sentido vertical, com uma velocidade uniforme e constante, e em um tempo não superior a 5 segundos, nunca submetendo o concreto a movimentos de torção lateral. O ensaio como um todo (do preenchimento até a desmoldagem), não ultrapassava o tempo de 1 minuto.

No instante em que ocorria a desmoldagem, imediatamente após o molde ser erguido, um cronômetro acionava e somente era parado, quando o concreto atingia a

marca de 500 mm especificada anteriormente. O tempo necessário (em segundos) que o concreto levava para alcançar essa marcação, define-se como t_{500} .

Após estabilização do concreto sobre a base, o seu espalhamento era aferido com auxílio de uma trena, através da média aritmética de duas medidas (em mm) perpendiculares do diâmetro do concreto espalhado.

3.2.3.2 Anel J

A habilidade passante do concreto autoadensável pode ser medida pelo ensaio do anel J. Esse anel, é um aparato metálico, com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura, constituído verticalmente por barras de aço de diâmetro de 10 mm em um espaçamento de 58 mm mais ou menos 2 mm, assim como mostra a Figura 16:

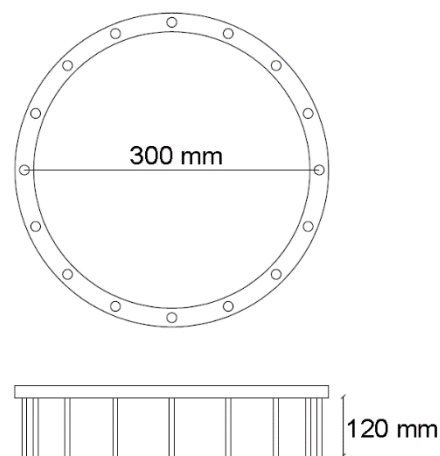


Figura 16 – Anel J
Fonte: Adaptado NBR 15823-3, 2010.

Da mesma forma como feito para o ensaio de espalhamento, tanto molde quanto aparato eram umedecidos a fim de não absorver umidade do concreto, e na sequência verificado se a placa de base estava nivelada corretamente. A Figura 17 apresenta a configuração de molde e Anel J, de como ficaram posicionados:

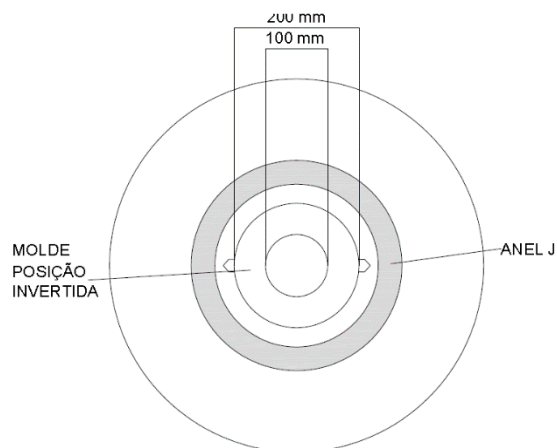


Figura 17 – Vista em planta do posicionamento do molde e do Anel J
Fonte: Adaptado NBR 15823-3, 2010.

Na sequência, preenchia-se o molde de forma contínua e uniforme com a amostra de concreto, sendo que a mesma novamente para ser coletada obedecia a NBR NM 33 (ASSOCIAÇÃO..., 1998). Novamente, a desmoldagem se dava pelo levantamento vertical cuidadoso do molde pelas alças, com a velocidade uniforme e constante em um tempo máximo de 5 segundos, sem que houvesse submissão da amostra a esforços de torção lateral. O processo como um todo, também não excedia o tempo de 1 minuto.

O resultado obtido se dava com base no diâmetro final alcançado pela amostra de concreto (obtido pela média aritmética de duas medidas perpendiculares), a diferença do valor entre o diâmetro encontrado no ensaio de espalhamento e o diâmetro obtido pelo ensaio do Anel J, e uma análise visual observando a obstrução da passagem do concreto pelas barras de aço.

3.2.4 Ensaio no estado endurecido do concreto

3.2.4.1 Resistência à compressão

A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) é um dado fundamental para qualquer tipo de projeto estrutural. Esse valor é obtido através de ensaios de resistência à compressão axial, utilizando-se corpos-de-prova cilíndricos submetidos a uma carga de compressão axial.

Os corpos de prova, depois de sua desmoldagem, ficaram com suas superfícies irregulares. Dessa forma, houve a necessidade de sua regularização das mesmas, onde o

processo se deu pela retificação dessas superfícies, com o objetivo de ter a carga distribuída sobre o corpo de prova de forma homogênea.

O ensaio de determinação da resistência à compressão foi baseado na NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO..., 2007). O resultado foi obtido pela razão entre a carga de ruptura (valor esse obtido através da leitura da prensa) pela área da seção transversal do corpo de prova cilíndrico. As idades analisadas para esse ensaio foram de 7 e 28 dias.

3.2.4.2 Resistência à tração

O concreto convencional é um material que tem boa resistência à compressão, porém sua resistência à tração não é da mesma escala. Como a pesquisa em questão analisou o comportamento do concreto quando adicionado fibras de aço (sendo o aço um material com alta resistência à tração), a resistência à tração foi analisada, com o objetivo de perceber o ganho que esse compósito teve.

A resistência à tração pode ser determinada por diferentes métodos, sendo eles: ensaio de tração direta, ensaio de tração na flexão e o ensaio de tração na compressão diametral (ruptura por fendilhamento). Pelas condições apropriadas e equipamentos disponíveis no laboratório, onde a pesquisa foi realizada, o método adotado foi o de tração por compressão diametral, utilizando corpo de prova 10 x 20 centímetros.

O ensaio foi regido segundo a NBR 7222 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), onde o corpo de prova foi colocado ao longo de uma geratriz, conforme mostra a Figura 18:

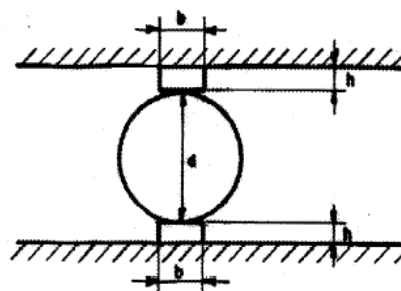


Figura 18 – Disposição do corpo de prova para ensaio de compressão diametral
Fonte: NBR 7222, 2010.

O resultado da resistência à tração (em MPa) foi obtido através da razão:

$$f_{t,D} = \frac{2 * F}{\pi * D * L}$$

Onde F é a carga de ruptura (em N), D e L são diâmetro (em mm) do corpo de prova e comprimento (em mm), respectivamente.

3.2.4.3 Módulo de elasticidade

Um material pode ser classificado como sendo frágil ou dúctil. O módulo de elasticidade é uma propriedade que os materiais possuem, a qual pode associar a essa classificação. O concreto é considerado um material frágil, enquanto que o aço um material dúctil. Dessa forma, quando se mistura esses dois tipos de materiais, a determinação experimental do módulo de elasticidade, pode explicar o comportamento desse novo compósito.

A Lei de Hooke relaciona que a deformação de um material é proporcional a tensão aplicada. Assim, a razão entre a tensão e a deformação específica é conhecida como sendo o módulo de elasticidade. Tal característica do concreto é outra propriedade importante a ser utilizada em projetos estruturais (para que assim seja possível o cálculo de deformações). O ensaio foi regido conforme a NBR 8522 (ASSOCIAÇÃO..., 2008).

De início, o corpo de prova (com as mesmas características dos cp's utilizados no ensaio de compressão e tração) foi posicionado na base da prensa de modo que, enquanto a carga fosse aplicada, a deformação fosse lida por 2 extensômetros eletrônicos, como é apresentado na Figura 19:



Figura 19 – Ensaio de módulo de elasticidade
Fonte: Autor, 2016.

Após posicionar o corpo de prova, foi aplicado um carregamento e aumentou a deformação específica, até que a tensão fosse elevada a 30% da carga de ruptura por compressão. Quando alcançado esse nível, manteve-se a carga por 60 segundos. Na sequência a carga foi reduzida (na mesma velocidade que foi carregada) até uma força próxima a zero e logo na sequência elevado até a tensão 0,5 MPa e estabilizando esse valor por 60 segundos. Na sequência, mais dois ciclos foram realizados, para que assim fosse possível obter o módulo de elasticidade, como mostra a Figura 20:

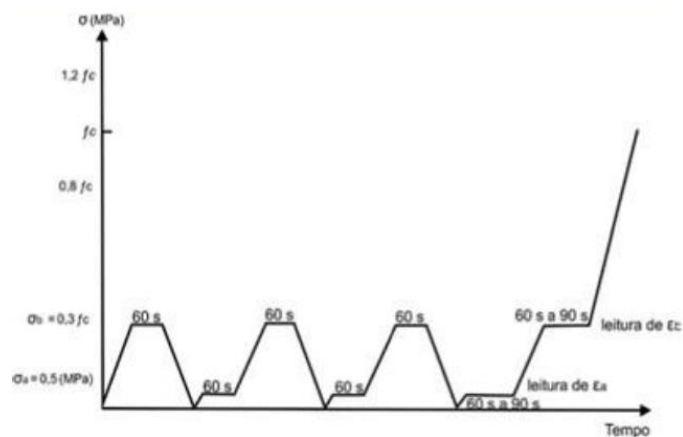


Figura 20 – Ciclos de carga e descarga para determinação do módulo de elasticidade
Fonte: NBR 8522, 2008.

O resultado do módulo dá-se pela divisão entre a diferença da tensão em 30% menos 0,5 MPa, pela diferença entre as deformações lidas nas tensões de 30% e com 0,5MPa.

3.2.4.4 Ensaio de Fadiga

Um material quando submetido a ciclos repetidos de tensão ou de deformação, pode romper-se através de sua estrutura, ou seja, esse material pode romper por fadiga. Analogamente à característica da resistência à tração e o módulo de elasticidade, onde se tem o concreto com baixa resistência à tração e um baixo valor de módulo de elasticidade quando comparado com o aço, o mesmo se aplica em relação à fadiga, o concreto com baixa resistência em relação ao aço.

Assim, da mesma forma como os ensaios de tração e módulo, buscou-se analisar o comportamento de um compósito, com dois materiais com comportamentos distintos a uma determinada característica mecânica.

Para ser possível caracterizar um material quanto à fadiga, são necessários ensaios laboratoriais, onde normalmente se é apresentado o resultado expresso em um gráfico que correlaciona tensão com o número de ciclos necessários para a ruptura do material.

Como o princípio do ensaio é aplicar cargas cíclicas ao corpo de prova, e analisar quantos ciclos são necessários para que haja ruptura ou determinada deformação, o presente ensaio utilizou um rompedor de concreto como forma de aplicação de carga cíclica, e extensômetros acoplados a um sistema de aquisição de dados para que assim fosse possível a leitura das deformações do concreto.

Para cada um dos 13 tipos de concreto, foram moldados 3 corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm, posicionados de forma a romper por compressão diametral (analogamente ao ensaio de resistência à tração). A utilização dos corpos de provas menores se deu pelo fato de que assim é necessária uma menor carga para ruptura. A medida que o rompedor aplicava a carga cíclica em uma frequência de 60 Hz (condição imposta pelo equipamento utilizado), os extensômetros aferiam a deformação lateral, sendo possível assim correlacionar número de ciclos com deformação. A Figura 21 apresenta o aparato montado:

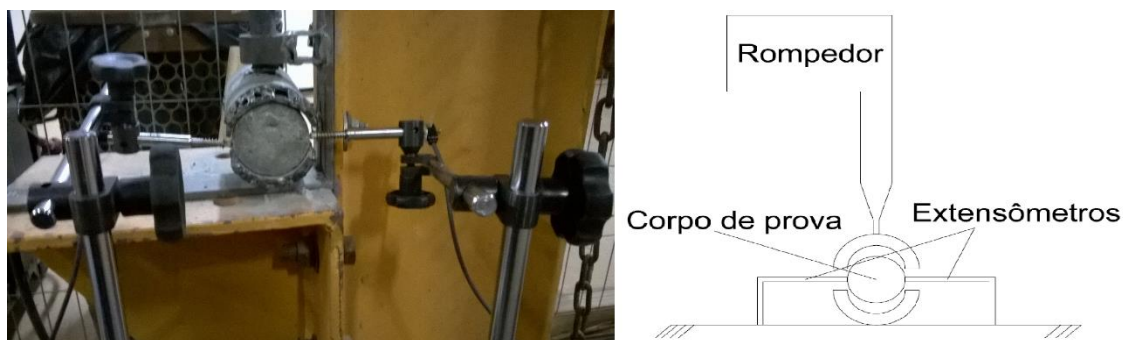


Figura 21 – Aparato envolvendo rompedor e extensômetros

Fonte: Autor, 2016.

Pelo fato do aparato conseguir controlar apenas as deformações (e não a tensão), a padronização do ensaio se deu pelo limite de deformação (fissura máxima que o corpo de prova poderia estar submetido). A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO..., 2014) em seu item 13.4.2 especifica que as fissuras podem variar de 0,2 mm a 0,4 mm. Porém para o ensaio em questão, foi padronizado verificar o tempo necessário para fissurar 1 mm, para assim ter um intervalo maior de ciclos.

3.2.5 Análise estatística

Após os ensaios realizados, os resultados foram tratados estatisticamente, de forma que fosse possível chegar a conclusões embasadas não apenas de forma intuitiva, mas sim através de um modelo matemático estatístico.

Como para a presente pesquisa foi incorporado ao concreto autoadensável, diferentes tipos de fibras, com diferentes teores, significam que tem duas variáveis interferindo simultaneamente nos resultados. Dessa forma, foi utilizado a análise de variância (ANOVA – *Analysis Of Variance*) fator duplo com repetição, a qual é indicada quando os resultados podem ser classificados com base em duas dimensões diferentes.

Dessa forma, essa análise indicou qual fator (tipo e/ou teor) teve efeito em um nível de confiança de 95%. Em caso confirmada essa diferença estatística, foi realizado o teste de comparações múltiplas de média (Teste de Tukey), para que então fosse possível afirmar qual amostra, é estatisticamente diferente de outra ou não.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio no estado fresco do concreto

Com o objetivo de analisar as propriedades de auto adensabilidade dos concretos, foram realizados ensaios em todas as 13 misturas. Para verificação da fluidez do concreto, foi analisado através do cone de Abrams o espalhamento e o t_{500} (tempo que o concreto demora para passar na marca de 500 mm).

Com relação a habilidade passante, a mesma foi analisada através do Anel J, a qual consiste na diferença entre o espalhamento do concreto sem e com o anel.

4.1.1 Ensaio de espalhamento e t_{500}

A NBR 15823-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) classifica o concreto autoadensável como *VS1* e *VS2* quando o tempo é menor ou igual a 2 segundos e maior que 2 segundos respectivamente. A classe *VS1* é indicada para lajes, paredes diafragmas, pilares – paredes, indústria de pré-moldados e concreto aparente, enquanto que a classe *VS2* tem uma aplicação indicada para vigas e pilas. A Figura 22 apresenta os valores obtidos para cada uma das misturas estudadas:

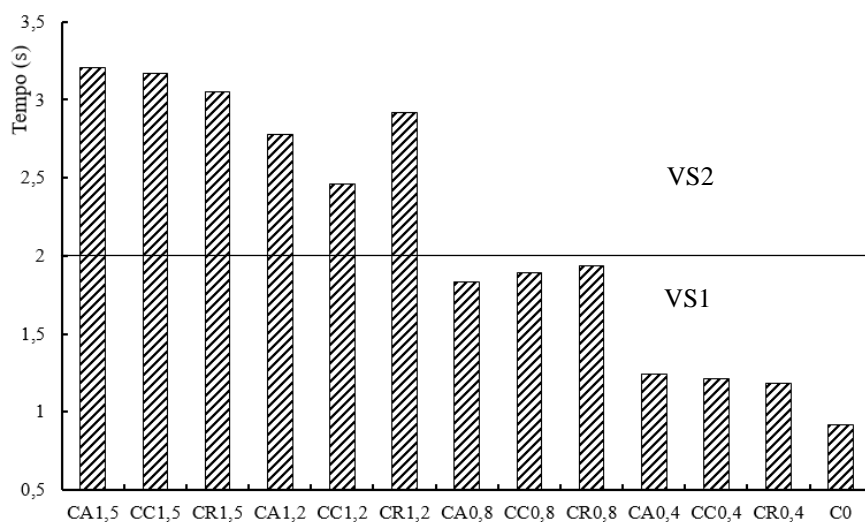


Figura 22 – Ensaio t_{500}
Fonte: Autor, 2016.

O concreto de controle (C0), e os concretos com 0,8% e 0,4% (CA0,8 a CR0,4) de adição de fibras, se enquadram como sendo da classe *VS1*, enquanto que os demais,

por ter o t_{500} superior a 2 segundos, na classe *VS2*, implicando assim em aplicações diferenciadas.

Já com relação ao espalhamento, a mesma normativa divide o concreto em 3 classes. Classe *SF1* que tem espalhamento entre 550 e 650 mm, *SF2* (660 a 750 mm) e *SF3* cujo espalhamento varia de 760 a 850 mm. A Figura 23 mostra os valores de espalhamento para cada mistura:

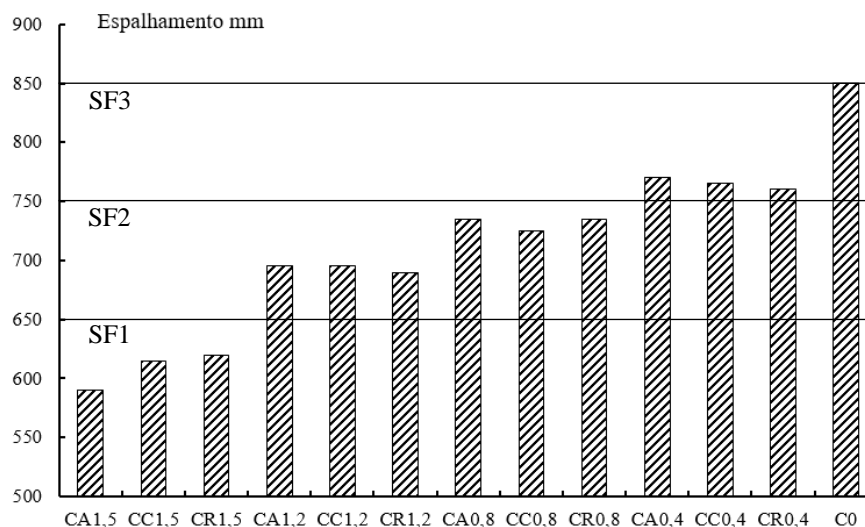


Figura 23 – Espalhamento

Fonte: Autor, 2016.

Os concretos de controle e com 0,4% (C0, CA0,4 a CR0,4) enquadraram-se (segundo mesma norma) como sendo da classe *SF 3*, cuja indicação é para utilizar em pilares-parede, paredes diafragma e pilares. Já os concretos CA1,2 a CR0,8 (teores de 0,8% e 1,2%) podem ser classificados como *SF2* e a indicação dos mesmos é para paredes, pilares e vigas. Os demais concretos (C2, CC1,5e CR1,5) que possuem 1,5% de adição de fibra de aço, acabaram se encaixando dentro da classe *SF1*, cuja indicação de uso é em lajes, revestimentos de túneis e estacas e certas fundações profundas.

4.1.2 Anel J

O ensaio de Anel J foi realizado conforme metodologia descrita pela NBR 15823-3 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), e sua classificação é feita pela mesma norma que classificou as características anteriormente analisadas.

O resultado consiste na diferença entre o valor do espalhamento sem utilizar o anel, com o valor do espalhamento utilizando o mesmo. A Figura 24 identifica esses dois tipos de espalhamento:



Figura 24 – Espalhamento da mistura C0 sem anel J (esquerda); com anel J (direita)
Fonte: Autor, 2016.

Os resultados obtidos para o Anel J de cada mistura, são apresentados conforme mostra a Figura 25:

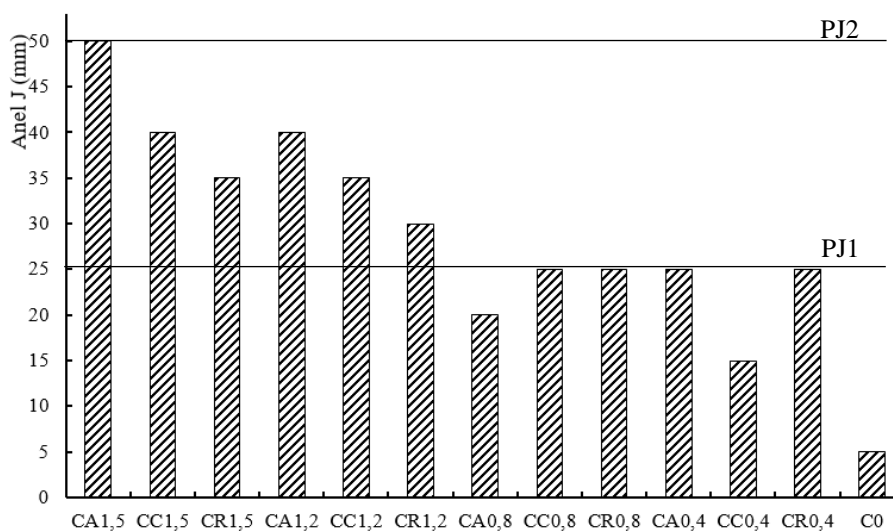


Figura 25 – Anel J
Fonte: Autor, 2016.

A classificação baseada nos resultados do anel J, são divididas em duas classes, conforme preconiza a NBR 15823-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). Classe *PJ1* cuja diferença entre espalhamentos deve ficar entre 0 e 25 mm, e classe *PJ2* onde a diferença deve respeitar o intervalo de 25 e 50 mm. Dessa forma, os concretos C0 e de CA0,8 a CR0,4 enquadram-se na primeira classe, cuja indicação de uso é vigas, pilares e indústrias de

pré-moldado, as demais misturas tem indicação de uso em lajes, painéis e elementos de fundações.

4.2 Ensaio no estado endurecido do concreto

4.2.1 Resistência à compressão

Após alcançadas as idades de 7 e 28 dias, cada amostra teve 3 corpos de prova rompidos para a determinação da resistência à compressão do concreto. O valor é obtido através da relação entre a carga e a seção transversal do corpo de prova, sendo o resultado expresso em MPa (N/mm^2). A partir do Apêndice C e do Apêndice D, é possível obter a Figura 26 que apresenta o comportamento da resistência do concreto para os diferentes tipos e teores de fibras:

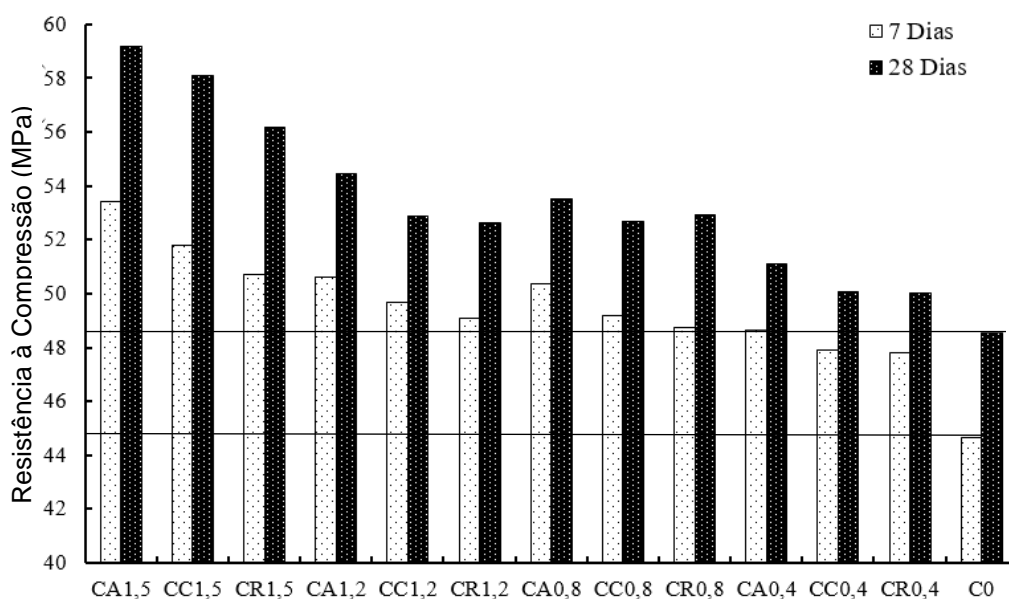


Figura 26 – Resistência à compressão (MPa)

Fonte: Autor, 2016.

O fato das misturas estudadas terem duas variáveis atuando simultaneamente, tipo de fibra utilizado (ancorada, corrugada e reta), com o teor aplicado (0,4%; 0,8%; 1,2% e 1,5%), é necessário realizar uma análise estatística, conforme descrito em 3.2.5, para que assim fosse possível verificar se houve interação entre essas duas variáveis.

Foi realizado o teste de variância ANOVA fator duplo com repetição, como primeira parte, em separado para cada uma das idades de 7 e 28 dias conforme mostra a Tabela 14 e a Tabela 15:

Tabela 14 – ANOVA Fator duplo para resistência à compressão aos 7 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	69,527	3	23,17558011	63,52462065	$1,5 \times 10^{-12}$	3,00878657
Tipo de Fibra	17,491	2	8,74555823	23,97170929	0,000001899512	3,402826105
Interações	2,833	6	0,472195743	1,294295777	0,297361668	2,508188823
Erro Aleatório	8,756	24	0,364828312			
Total	98,607	35				

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 15 – ANOVA Fator duplo para resistência à compressão aos 28 dias

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	256,98498	3	85,661658	156,44703	$6,9 \times 10^{-17}$	3,00878657
Tipo de Fibra	16,741619	2	8,3708094	15,287916	0,00005230347084314	3,402826105
Interações	6,3918897	6	1,0653149	1,9456237	0,114163639	2,508188823
Erro Aleatório	8,756	24	0,364828312			
Total	293,25954	35				

Fonte: Autor, 2016.

A análise de ANOVA fator duplo com repetição, para o presente caso verifica se o efeito do teor é significativo (1ª linha da tabela), se o efeito do tipo de fibra é significativo (2ª linha), e ainda se o efeito de interação entre essas duas variáveis é significativo também, ou seja, se uma variável interfere na outra ou se cada uma tem comportamento independente.

Essa verificação pode ser feita comparando os valores de F com os valores de $F_{crítico}$, sendo que se o valor de F é maior, o efeito é significativo e caso o $F_{crítico}$ seja o maior, esse mesmo efeito estatisticamente, não é comprovado. Outra forma de se fazer a mesma análise, é comparando o p valor com α . Como é uma análise onde o intervalo de confiança é de 95%, α vale 5%, ou seja, 0,05. Assim, caso o p valor seja menor que α , o efeito é significativo.

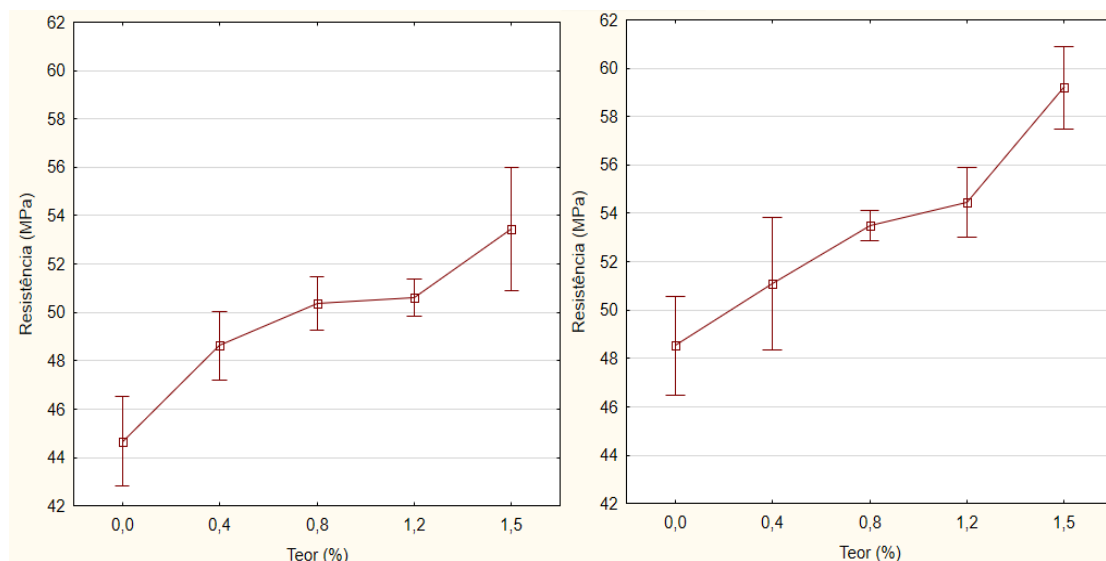
Para ambas as idades é possível perceber que como, o F é menor que o $F_{crítico}$, assim como o p valor é maior que 0,05 (α), para as interações, o efeito entre tipo de fibras e o seu teor não é significativo. Em contrapartida, quando analisados separadamente, variar o teor de fibras tem uma significância maior que variar o tipo de fibra.

A análise de ANOVA indica se há significância, enquanto que o teste de comparações de médias (teste de Tukey) especifica quais valores são diferentes. Como a

significância é maior quando variado o teor de fibras, cada tipo de fibra foi analisado separadamente.

- Fibra Ancorada:

A Figura 27 apresenta os resultados obtidos para a fibra ancorada, variando o teor em cada mistura de concreto:



**Figura 27 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à compressão fibra ancorada Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

Para a idade de 7 dias, é possível observar que mesmo que adicionando 0,4% que é o menor teor, existe diferença estatística ao traço de controle, ou seja, a propriedade de resistência à compressão tem ganhos com essa adição. Entretanto, comparando os teores de 0,4% a 1,2% entre si, estatisticamente são iguais. Assim é possível obter a mesma característica, adicionando uma quantia menor de fibras. Com relação a adição de 1,5%, a mesma se diferencia do concreto de controle e do incremento de 0,4%, porém o mesmo não ocorre quando comparado com os teores de 0,8% e 1,2%.

Com relação a idade de 28 dias, o comportamento é um pouco diferente. O teor de 0,4% é diferente estatisticamente do controle, e o teor de 1,5% é diferente de todos os demais. A faixa intermediária de 0,4% a 1,2% podem ser consideradas iguais para esse intervalo de confiança. E ainda havendo esses valores que indicam o mesmo efeito quando variado determinado teor, é possível verificar um ganho de resistência (para determinadas quantias) com o aumento do teor de fibras.

- Fibra Corrugada:

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos para a fibra corrugada, variando o teor em cada mistura de concreto:

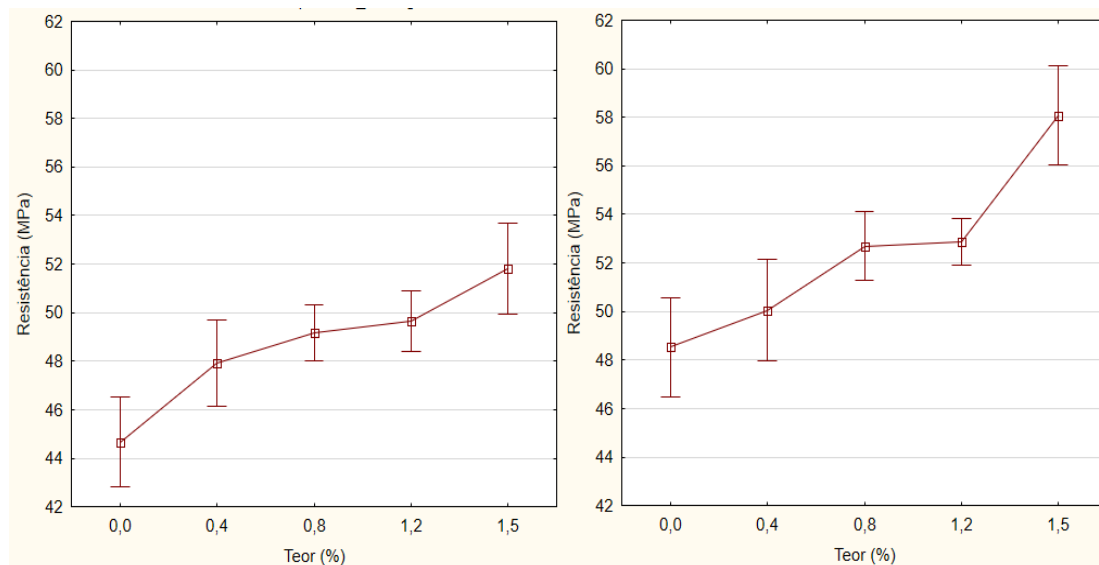


Figura 28 – Intervalo de confiança 95% para resistência à compressão fibra corrugada Esquerda 7 dias e direita 28 dias

Fonte: Autor, 2016.

O comportamento para a idade de 7 dias da fibra corrugada difere do comportamento para a mesma idade da fibra ancorada. O teor de 0,4% já não mais é diferente do concreto de controle e o mesmo só difere quando adicionados 1,5%. Em contrapartida, esse mesmo teor, tem o comportamento igual quando usados os teores de 0,8% e 1,2%. Dessa forma, é necessário que sejam empregados no mínimo, 0,8% para que exista alguma diferença em relação ao controle, e essa quantia tem estatisticamente a mesma influencia quando adicionados os teores mais elevados.

Quando analisados os resultados aos 28 dias, novamente apenas a partir do teor de 0,8% é possível perceber um pequeno ganho de resistência, assim como ocorreu para a fibra ancorada. O incremento de 1,5% é diferente de todos os demais, e os teores intermediários de 0,8% e 1,2% são iguais entre si e diferem do concreto de controle, porém quando comparados a 4% tem o mesmo intervalo.

- Fibra Reta:

A Figura 29 apresenta os resultados obtidos para a fibra reta, variando o teor em cada mistura de concreto:

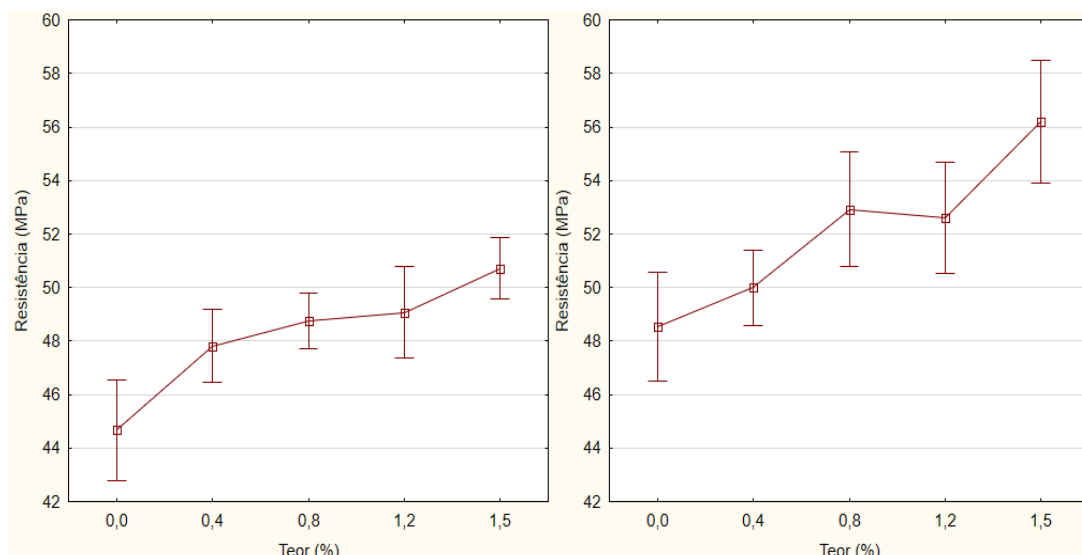


Figura 29 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à compressão fibra reta
Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.

O último tipo de fibra analisado foi a fibra reta. Na idade de 7 dias, assim como para os outros dois tipos de fibra, é possível ver ganho de resistência somente quando adicionados 0,8%. Esse teor tem o mesmo comportamento quando adicionados maiores quantias. Já o teor de 0,4% difere apenas da máxima quantia adicionada de 1,5%.

Para a idade de 28 dias, assim como a de 7 dias, o comportamento foi semelhante quando comparado aos outros dois tipos de fibra. Adicionando 0,4% não existe diferença do controle, e a quantia que começa a apresentar ganhos, a de 0,8%, é estatisticamente igual aos demais teores. O teor máximo empregado, difere apenas do concreto sem adição, e com 0,4%. É possível perceber também, que existe um comportamento não presente nos demais casos, de uma pequena redução na resistência, quando aumentado o teor de fibras.

4.2.2 Resistência à tração

Da mesma forma como feito para a compressão, após as idades de 7 e 28 dias serem alcançadas, foram ensaiados 3 corpos de prova para cada amostra, com a finalidade de determinar a resistência à tração. O ensaio foi realizado conforme descrito em 3.2.4.2, sendo o resultado expresso em MPa. Com base nos Apêndice E e Apêndice F, obteve-se a Figura 30 que mostra o comportamento da resistência à tração por compressão diametral do concreto, quando se emprega os diferentes tipos com os diferentes teores de fibras de aço:

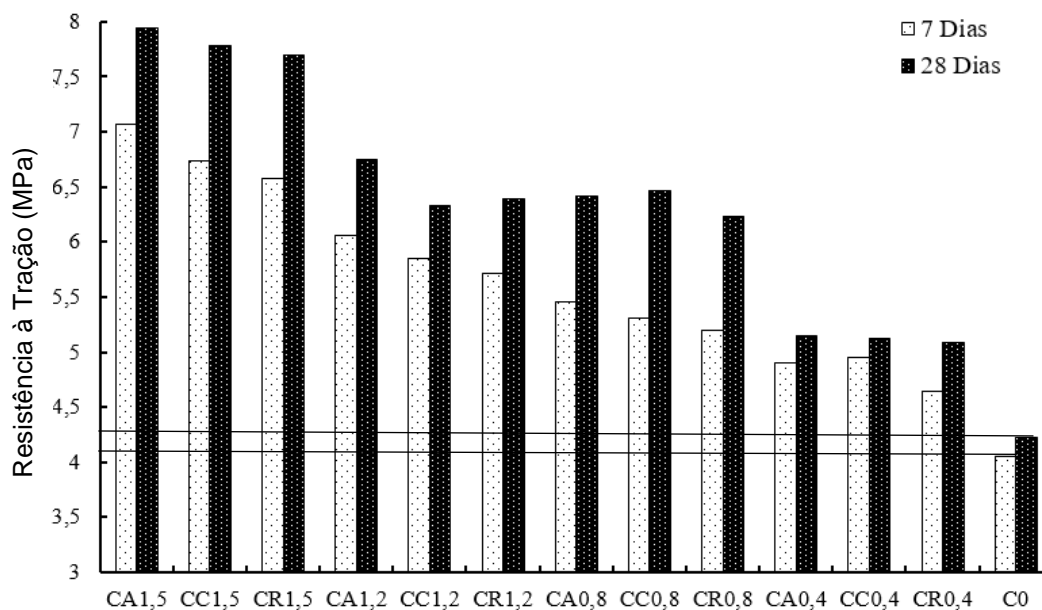


Figura 30 – Resistência à tração (MPa)

Fonte: Autor, 2016.

Assim como feito para a resistência à compressão, pelo fato de atuarem simultaneamente duas variáveis, foi necessário realizar a mesma análise estatística. Novamente foi empregado o teste de variância ANOVA fator duplo com repetição, separadamente para cada uma das idades de 7 e 28 dias como apresentado nas Tabelas 16 e Tabela 17:

Tabela 16 – ANOVA Fator duplo para resistência à tração aos 7 dias

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	19,179459	3	6,3931531	57,378817	$4,3 \times 10^{-11}$	3,0087866
Tipo de Fibra	0,6911292	2	0,3455646	3,101457	0,063379491	3,4028261
Interações	0,1342151	6	0,0223692	0,2007644	0,973266925	2,5081888
Erro Aleatório	2,6740822	24	0,1114201			
Total	22,678886	35				

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 17 – ANOVA Fator duplo para resistência à tração aos 28 dias

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	32,528321	3	10,842774	154,35128	$8,1 \times 10^{-17}$	3,0087866
Tipo de Fibra	0,2822521	2	0,1411261	2,0089866	0,15606097032547300	3,4028261
Interações	0,2073836	6	0,0345639	0,4920317	0,80783250681515300	2,5081888
Erro Aleatório	1,6859372	24	0,0702474			
Total	34,703893	35				

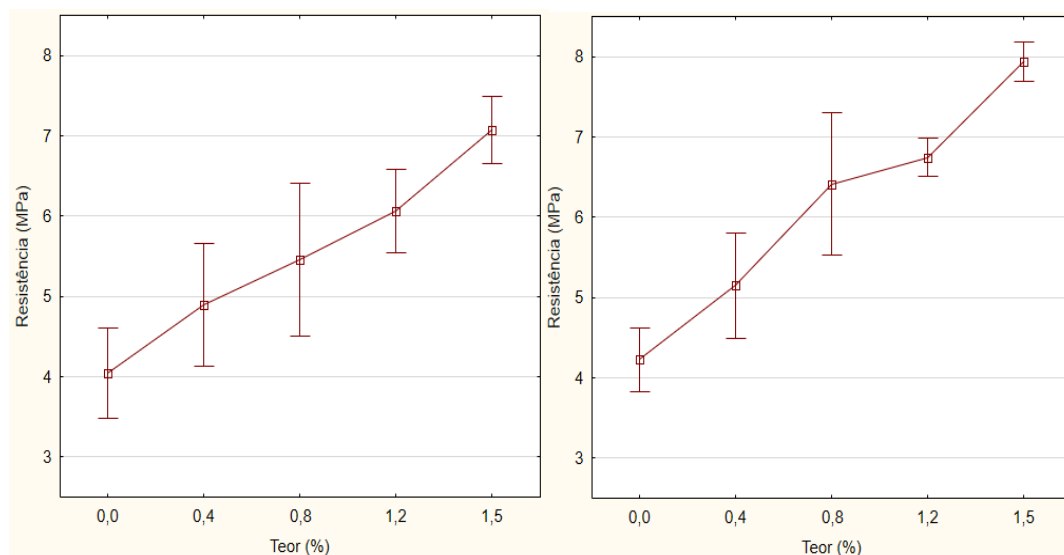
Fonte: Autor, 2016.

Para ambas as idades é possível perceber que como, o F é menor que o $F_{\text{crítico}}$, assim como o p valor é maior que 0,05 (α), o efeito entre tipos de fibras e o seu teor não é significativo, assim como variar o tipo de fibra. Dessa forma, para a resistência à tração, o único fator que se mostrou com diferença significativa, foi o teor utilizado das fibras.

Em seguida, foi realizado o teste de comparações de médias (teste de Tukey) para cada tipo de fibra:

- Fibra Ancorada:

A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para a fibra ancorada, variando o teor em cada mistura de concreto:



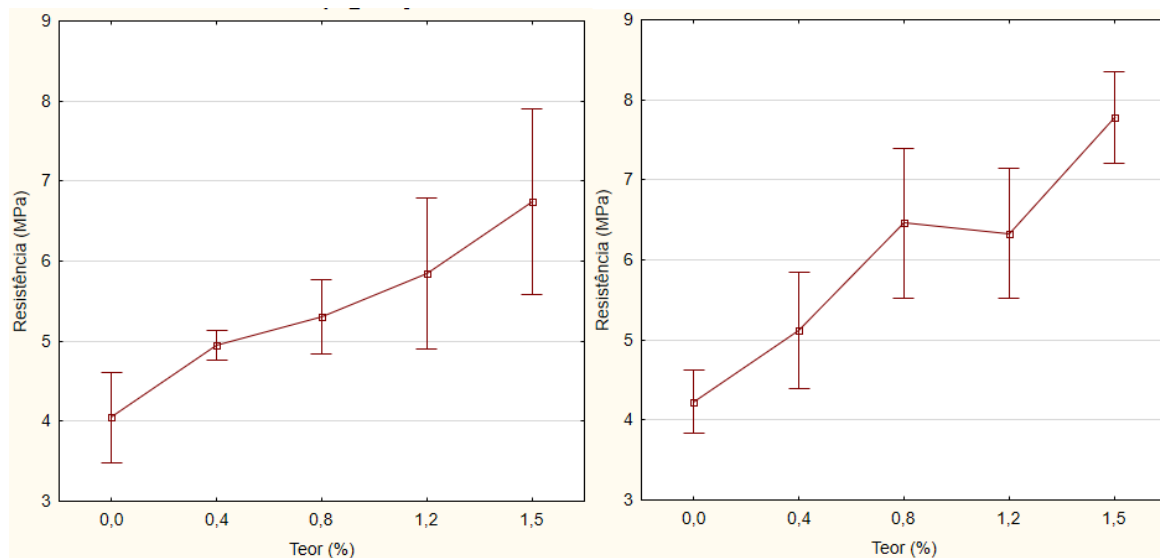
**Figura 31 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à tração fibra ancorada
Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

A resistência à tração analisada aos 7 dias, mostra que diferentemente da resistência à compressão, começa a ter diferença significativa em relação ao concreto de controle, quando incorporados os teores superior a 1,2%. É possível perceber também que o teor de 1,5% é diferente dos demais, com ganho de resistência à tração, enquanto que os teores intermediários têm valores próximos.

Quando analisado a idade de 28 dias, o ganho de resistência é possível com um teor menor, 0,8%. Assim como para a idade de 7 dias, os teores intermediários têm valores próximos. Para a maior taxa de adição, é possível perceber que a diferença é significativa, podendo chegar ao dobro da resistência do concreto de controle.

- Fibra Corrugada:

A Figura 32 apresenta os resultados obtidos para a fibra corrugada, variando o teor em cada mistura de concreto:



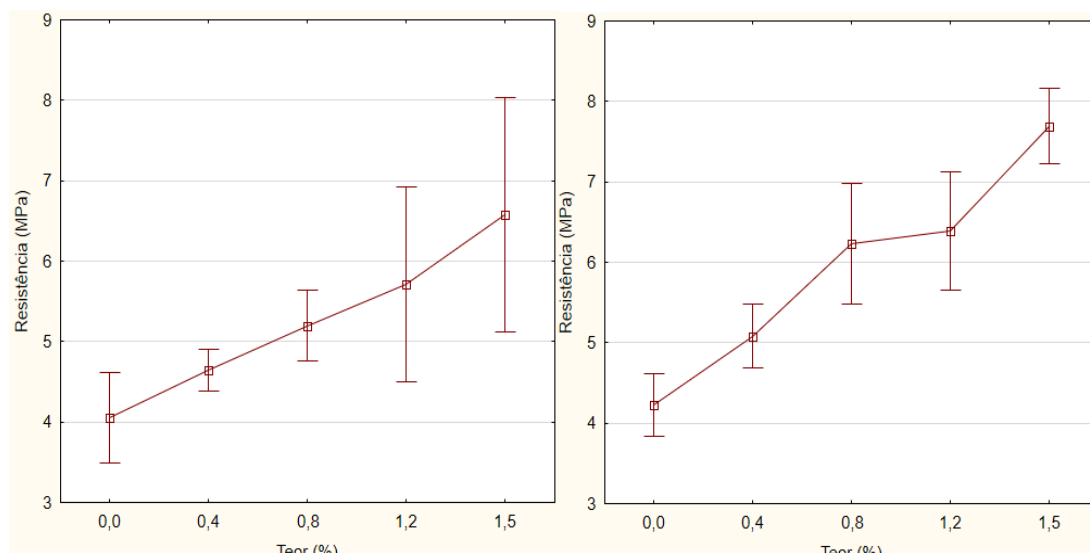
**Figura 32 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à tração fibra corrugada Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

Analisando a idade de 7 dias, utilizando a fibra corrugada, é possível ter diferenças significativas já com um baixo teor de adição, ou seja, com apenas 0,4% é possível afirmar um ganho de resistência. Esse mesmo teor não difere estatisticamente dos outros teores intermediários. Com relação ao teor máximo, difere apenas dos concretos de controle e com 0,4% de adição.

Para a idade de 28 dias é necessário adicionar 0,8% para obter diferença significativa, o qual tem o mesmo resultado quando comparado ao teor de 1,2%. Os teores intermediários mais uma vez apresentam comportamento semelhante entre si, e com relação ao máximo teor adicionado, é semelhante quando se tem 0,8%, porém não quando comparado ao teor de 1,2%, algo que não seria o habitual.

- Fibra Reta:

A Figura 33 apresenta os resultados obtidos para a fibra reta, variando o teor em cada mistura de concreto:



**Figura 33 – Intervalo de confiança de 95% para resistência à tração fibra reta
Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

A idade de 7 dias, apresenta que é necessário adicionar 0,8% de fibras, para que haja ganho de resistência na tração, e que esse teor é igual estatisticamente a todos os demais outros. Novamente as adições intermediárias tem seus comportamentos semelhantes, com a diferença que o teor de 1,2% pode ser considerado o mesmo quando comparado ao concreto de controle. A quantidade de adição máxima difere apenas das misturas de controle e com 0,4% de adição.

Para a idade de 28 dias, em contrapartida, com apenas 0,4% já se tem ganhos na resistência e o teor máximo difere de todos os demais. As adições de 0,8% e 1,2% não apresentam diferenças estatísticas entre si, porém são diferentes quando comparados as outras amostras.

4.2.3 Módulo de elasticidade

Como realizado para compressão e tração, 3 corpos de prova foram ensaiados as idades de 7 e 28 dias para que assim fosse possível determinar o módulo de elasticidade de cada uma das misturas. O ensaio procedeu como descrito em 3.2.4.3, de forma que o resultado é expresso em GPa ($10^3 \times \text{N/mm}^2$). Através dos Apêndice G e Apêndice H, é possível obter à Figura 34, a qual apresenta o comportamento do módulo de elasticidade de cada uma das misturas:

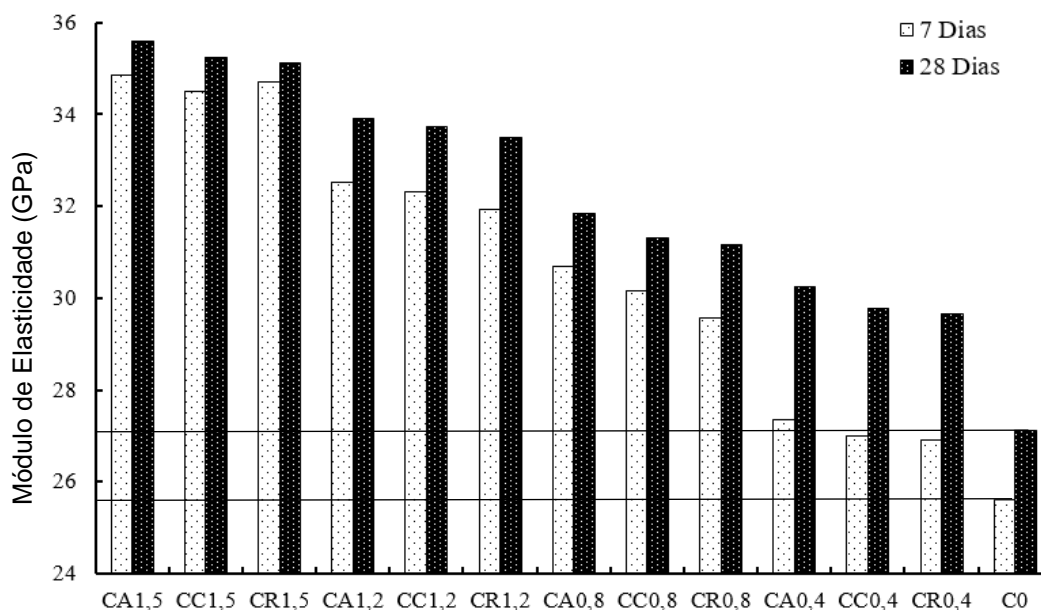


Figura 34 – Módulo de elasticidade (GPa)

Fonte: Autor, 2016.

Da mesma forma como feito para as resistências à compressão e à tração, foi realizado análise estatística (pela razão das variáveis teor e tipo atuarem de forma simultânea). Tal análise foi de teste de variância ANOVA fator duplo com repetição, tendo sido feito em separado para as idades de 7 e 28 dias, como é apresentado na Tabela 18 e Tabela 19:

Tabela 18 – ANOVA Fator duplo para módulo de elasticidade aos 7 dias

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	279,94408	3	93,314692	475,97394	$1,7 \times 10^{-21}$	3,0087866
Tipo de Fibra	1,8782722	2	0,9391361	4,7902888	0,0177613908157807000000	3,4028261
Interações	0,9664833	6	0,1610806	0,82163	0,5642514643835360000000	2,5081888
Erro Aleatório	4,7052	24	0,19605			
Total	287,49403	35				

Fonte: Autor, 2016.

Tabela 19 – ANOVA Fator duplo para módulo de elasticidade aos 28 dias

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	155,97033	3	51,990111	301,75152	$3,5 \times 10^{-20}$	3,0087866
Tipo de Fibra	1,8941722	2	0,9470861	5,4969045	0,01083029505869100000	3,4028261
Interações	0,1317833	6	0,0219639	0,1274788	0,99169560462241800000	2,5081888
Erro Aleatório	4,1350667	24	0,1722944			
Total	162,13136	35				

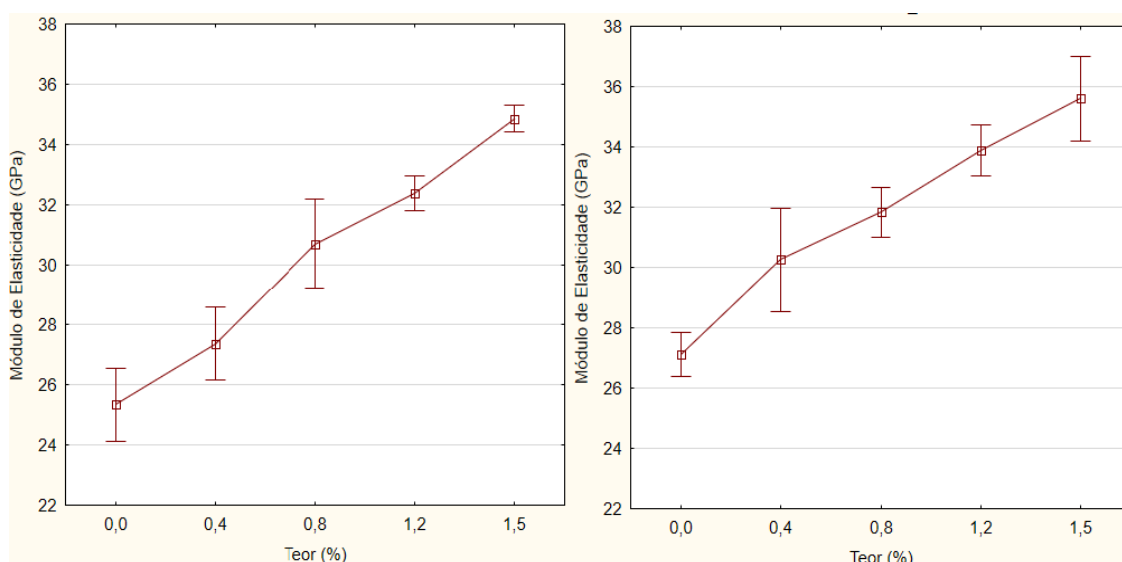
Fonte: Autor, 2016.

Através da análise das idades de 7 e 28 dias é possível perceber que como, o F é menor que o $F_{crítico}$, assim como o p valor é maior que 0,05 (α), o efeito entre tipos de fibras e o seu teor não é significativo. Analisando os demais dados, para o módulo de elasticidade, o fator que se mostrou com diferença significativa maior, foi variar o teor utilizado das fibras quando comparado com a variação do tipo de fibras, pelas mesmas questões citadas anteriormente.

Na sequência, também foi realizado o teste de comparações de médias (teste de Tukey) para cada tipo de fibra sendo analisado cada uma separadamente:

- Fibra Ancorada:

A Figura 35 apresenta os resultados obtidos para a fibra ancorada, variando o teor em cada mistura de concreto:



**Figura 35 – Intervalo de confiança de 95% para módulo elasticidade fibra ancorada
Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

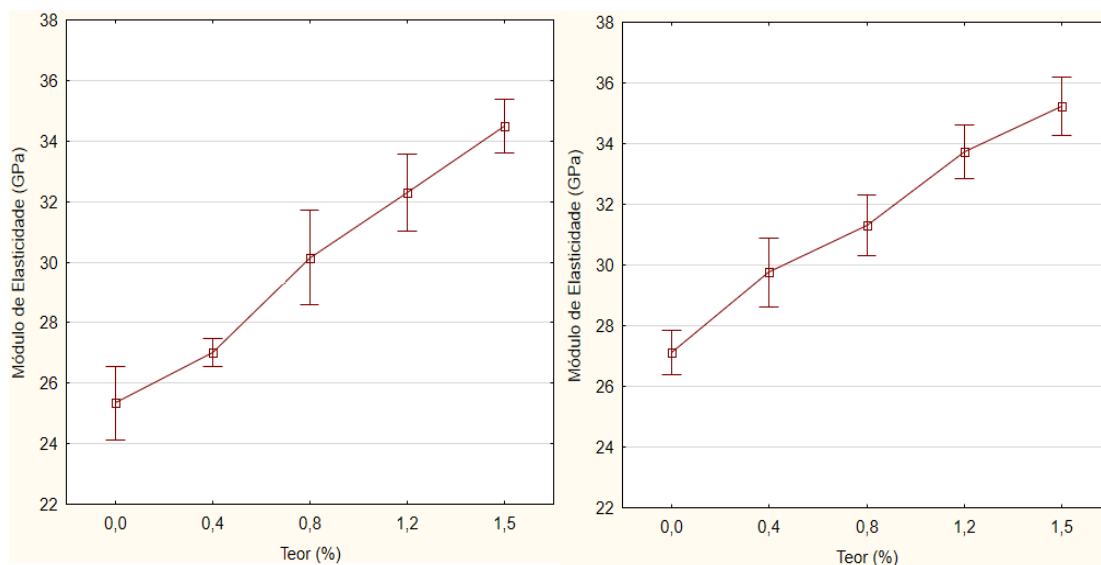
O módulo de elasticidade quando analisado a idade de 7 dias, começa a ter aumento quando comparado ao concreto de controle, com o teor de 0,8%. Essa quantia ainda é semelhante a adição de 1,2%. Para o máximo de teor utilizado, não há outra mistura que seja estatisticamente igual.

O comportamento quando a análise é feita aos 28 dias, difere da anterior, pois agora com um teor de 0,4%, já se tem diferença significativa quando comparada ao concreto de controle. Esse mesmo teor ainda tem comportamento semelhante ao teor de

0,8%. Já com relação aos incrementos de 1,2% e 1,5%, são iguais entre si, e diferente das demais misturas analisadas.

- Fibra Corrugada:

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos para a fibra corrugada, variando o teor em cada mistura de concreto:



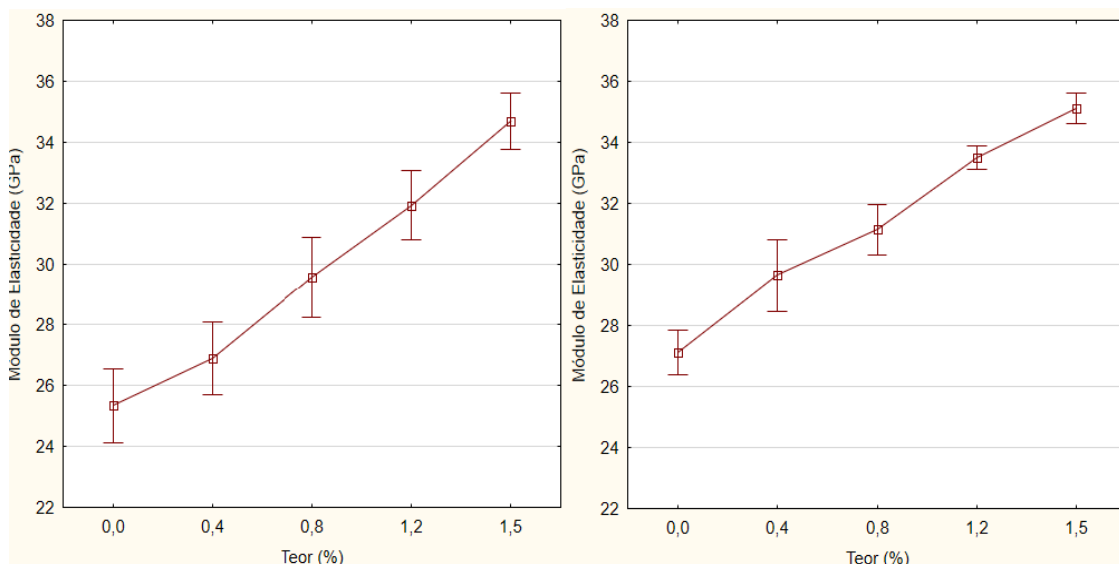
**Figura 36 – Intervalo de confiança de 95% para módulo elasticidade fibra corrugada
Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

Para a idade de 7 dias é possível verificar a necessidade de adicionar um teor de 0,8% para se ter uma diferença significativa no módulo de elasticidade em relação ao concreto de controle. Esse mesmo teor ainda pode ser considerado estatisticamente igual ao teor de 1,2%. Já com relação a adição máxima de fibras, é possível afirmar que só tem comportamento semelhante quando comparado ao teor de 1,2%.

Com relação a idade de 28 dias, o aumento no módulo considerando o concreto sem fibras, já é possível com o incremento de 0,4%, teor esse que é considerado igual ao de 0,8%. São considerados estatisticamente iguais, os concretos que possuem 1,2% e 1,5%, sendo também diferentes dos demais.

- Fibra Reta:

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos para a fibra reta, variando o teor em cada mistura de concreto:



**Figura 37 – Intervalo de confiança de 95% para módulo elasticidade fibra reta
Esquerda 7 dias e direita 28 dias
Fonte: Autor, 2016.**

Para a fibra reta, com a idade de 7 dias, o comportamento do módulo de elasticidade é percebido com aumento significativo (quando comparado ao concreto de controle) com o teor de 0,8%. Juntamente com esse teor, com resultados semelhantes é observado para a adição de 1,2%. Já quando analisado o máximo de fibras incrementado, esse teor é diferente de todos os outros.

Com relação a idade de 28 dias, o mesmo ganho descrito anteriormente já é possível com o teor de 0,4%. Tal quantia, tem o comportamento parecido (estatisticamente comparando) com o teor de 0,8%. Já com relação aos outros dois teores (1,2% e 1,5%), são diferentes entre si, e também além disso, diferem das outras demais misturas.

4.2.4 Ensaio de Fadiga

Da mesma forma que todos os demais ensaios realizados no estado endurecido, 3 corpos de prova, dessa vez com a diferença que são corpos cilíndricos 5 X 10 cm (não 10 x 20 cm como os demais ensaios) foram ensaiados com o objetivo, de associar os compósitos estudados, a uma característica remetente à fadiga do material, conforme descrito em 3.2.4.4, de forma que o resultado é o número de ciclos necessários para abertura de uma fissura de 1 mm. Com base no Apêndice I, é possível analisar os dados conforme é mostrado na Figura 38:

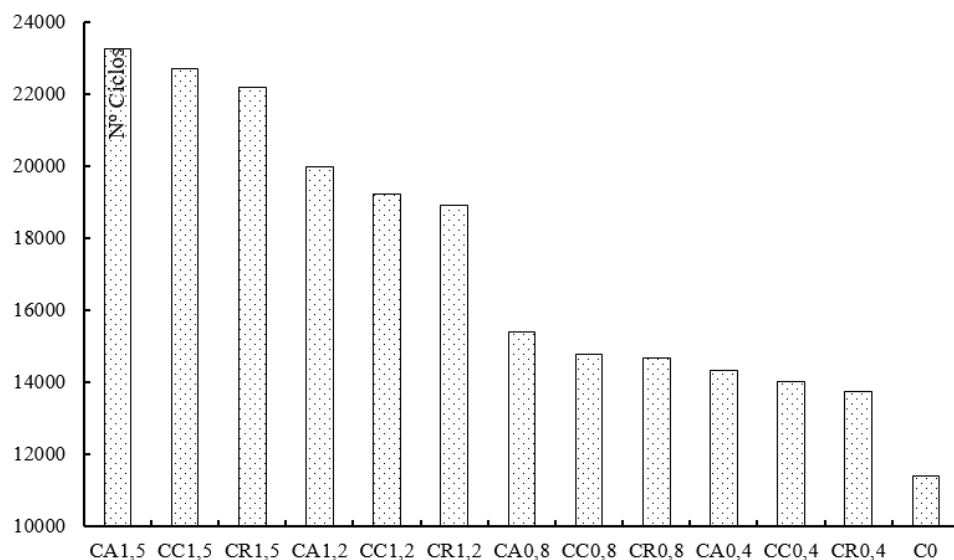


Figura 38 – Ensaio de fadiga

Fonte: Autor, 2016.

Assim como realizado em todos os demais ensaios no estado endurecido, também foi empregado a análise estatística, sendo essa análise o teste de variância ANOVA fator duplo com repetição, para o ensaio de fadiga. Dessa vez, a única idade que foi realizado o ensaio foi a de 28 dias, conforme mostra a Tabela 20:

Tabela 20 – ANOVA Fator duplo para fadiga aos 28 dias

Fonte da variação	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Teor	734154080	4	183538520	200,772863	$3,4 \times 10^{-22}$	2,68962757
Tipo de Fibra	3741280	2	1870640	2,04629387	0,146865341532855	3,3158295
Interações	1287520	8	160940	0,17605233	0,992540818426597	2,26616327
Erro Aleatório	27424800	30	914160			
Total	766607680	44				

Fonte: Autor, 2016.

Após análise de variância realizada, é possível verificar que como, o *F* é menor que o *F crítico*, assim como o *p valor* é maior que 0,05 (α), o efeito entre tipos de fibras e o seu teor não é significativo, assim como a variação do tipo de fibras. Assim, o fator que se mostrou com diferença significativa, foi o teor utilizado das fibras. Em seguida, também foi realizado o teste de comparações de médias (teste de Tukey).

- Fibra Ancorada:

A Figura 39 apresenta os resultados obtidos para a fibra ancorada, variando o teor em cada mistura de concreto:

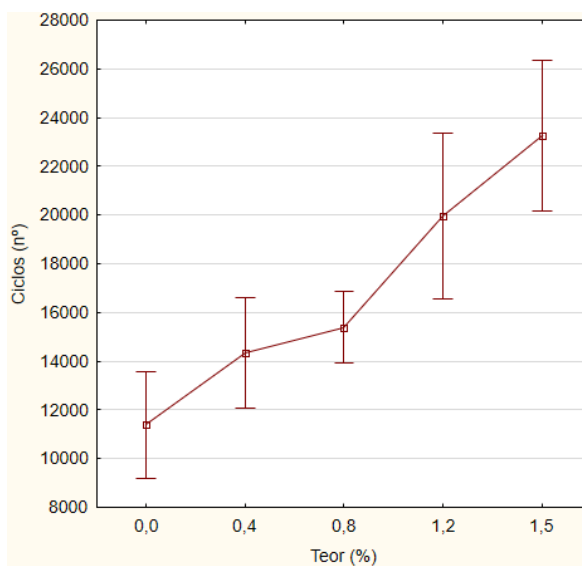


Figura 39 – Intervalo de confiança de 95% para fadiga fibra ancorada
Fonte: Autor, 2016.

Comparando os teores de adição com o concreto de controle, obteve uma diferença significativa quando incorporados 0,8% de fibras. Teor esse que é igual tanto ao de 1,2% quanto o de 0,4%. Já o teor de 1,5%, tem valores estatisticamente iguais ao concreto com 1,2% e diferente dos demais.

- Fibra Corrugada:

A Figura 40 apresenta os resultados obtidos para a fibra corrugada, variando o teor em cada mistura de concreto:

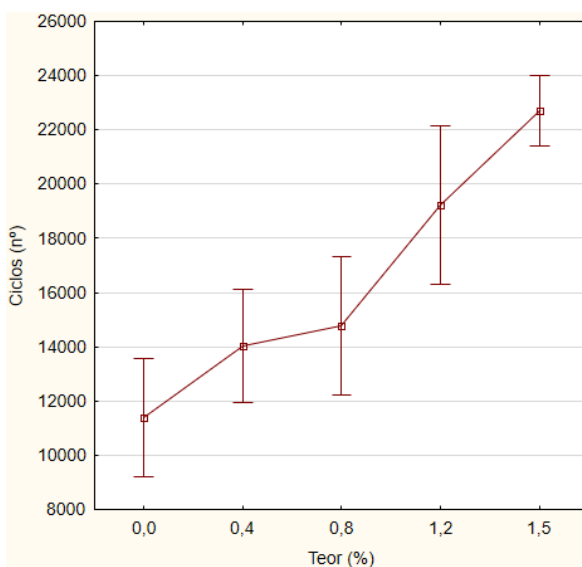


Figura 40 – Intervalo de confiança de 95% para fadiga fibra corrugada
Fonte: Autor, 2016.

Diferentemente da fibra ancorada, a fibra corrugada precisou de 1,2% de adição de fibras, para que suas características fossem estatisticamente diferentes do concreto de controle, significando assim que os tanto os teores de 0,4% e 0,8% possuem valores estatisticamente iguais ao concreto sem fibras. Com relação ao teor máximo utilizado, o mesmo pode ser comparado ao concreto com 1,2% de fibras.

- Fibra Reta:

A Figura 41 apresenta os resultados obtidos para a fibra reta, variando o teor em cada mistura de concreto:

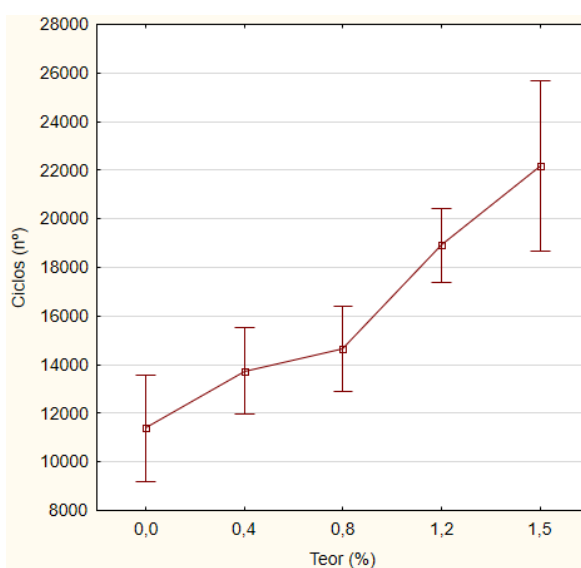


Figura 41 – Intervalo de confiança de 95% para fadiga fibra reta
Fonte: Autor, 2016.

Da mesma forma como ocorrido para a fibra corrugada, a fibra reta necessitou de 1,2% de adição de para ter diferença estatística quando comparado ao concreto de controle. A diferença foi de que esse mesmo teor se assemelha unicamente com o máximo empregado de 1,5%, diferindo assim dos outros demais.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos para o concreto no estado fresco foi possível verificar que a medida que o teor de fibras é aumentado, existe uma perda da fluidez, verificado tanto pelo ensaio de espalhamento, quanto pelo t_{500} . Entretanto, o tipo de fibra (ancorada, corrugada e reta) não interferiu, uma vez que os resultados obtidos foram próximos. Para o concreto de referência, foi obtido um t_{500} inferior a 1 segundo, e para o concreto com maior teor (1,5%) obteve um resultado de pouco mais de 3 segundos; da mesma forma, o espalhamento teve um melhor resultado para o concreto sem fibras (850 mm), enquanto que os concretos com os teores de 1,5%, obtiveram um espalhamento médio de 608 mm.

Com relação ao ensaio do Anel J, que verifica a habilidade passante do concreto autoadensável, o comportamento foi análogo aos ensaios anteriormente descritos. Quanto maior o teor incorporado de fibras, maior a dificuldade do concreto passar pelo obstáculo oferecido pelo Anel J. A mistura de referência teve uma redução de apenas 5 mm (espalhamento sem e com o anel), enquanto que as misturas com os teores de 1,5% tiveram uma redução média de 42 mm. Dessa forma é possível observar, que todas as misturas se enquadraram dentro do que solicita a NBR 15283-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010), porém com diferentes indicações, sendo elas pilares, vigas e indústrias de pré-moldado (diferenças entre 0 e 25 mm – PJ 1); e lajes, elementos de fundações e painéis (diferenças entre 25 e 50 mm – PJ 2).

Verificando os resultados obtidos para o concreto autoadensável no estado endurecido, é possível observar um comportamento diferente quando analisados os resultados do estado fresco. Para o concreto no seu estado fresco, foi possível perceber perda de trabalhabilidade e habilidade passante com o aumento do teor, ou seja, as vantagens do concreto autoadensável são diminuídas. Entretanto, quando analisadas as propriedades mecânicas do concreto, à medida que a quantidade de fibras é incrementada em determinados teores, os valores de resistência também aumentam.

Em relação à resistência à compressão do concreto em ambas idades, verificou-se que a variação no teor de fibras revelou-se significativa, enquanto que o tipo de fibra não.

Para a fibra ancorada, o comportamento difere quando muda a idade do ensaio. Para os resultados de 7 dias, mesmo quando adicionado o menor teor de fibras (0,4%) quando comparado à mistura de controle, já foi possível observar aumento na resistência

(após aplicação de análise estatística). Já para a idade de 28 dias, para chegar a essa diferença estatística, foi necessário um teor de 0,8%. Com relação ao maior teor de adição (1,5%), se mostrou mais eficaz, apenas para a idade de 28 dias, sendo que para os 7 dias, o mesmo não apresentou diferença estatística quando comparado com as adições de 0,8% e 1,2%.

A fibra corrugada, diferente da ancorada, possui um comportamento semelhante quando variado as idades de 7 e 28 dias. Para ambas as idades é necessária uma adição de 0,8% para obter melhoras estatísticas, sendo que esse teor, não difere quando adicionados 1,2%. Já com relação ao máximo adicionado, apenas para a idade de 28 dias é possível observar ganho de resistência, assim como ocorreu para a fibra ancorada.

Quando analisadas as fibras retas, é possível perceber que a incorporação de 1,5% não proporciona ganho de resistência quando comparado com os teores de 0,8% e 1,2%, tanto para a idade de 7 quanto para 28 dias. Já para obter qualquer melhora quando comparado com um concreto sem fibras, assim como o caso da fibra ancorada, é necessário um teor de 0,8% para ambas as idades analisadas.

De acordo com o ACI 544 IR-96 (2006), existe um acréscimo de no máximo 15% de resistência à compressão para teores de até 1,5%, enquanto que alguns autores como Bentur e Mindess (2007) e Balaguru e Shah (1992) referenciam que para teores de até 2,0% o acréscimo na resistência à compressão não ultrapassa 25%. A pesquisa de Medeiros (2012), empregou um teor de 0,64% de fibras, e obteve um ganho de 10,67% (78,7 MPa para 87,1 MPa). As Figuras 42 e 43, mostram os ganhos da resistência a compressão do presente estudo:

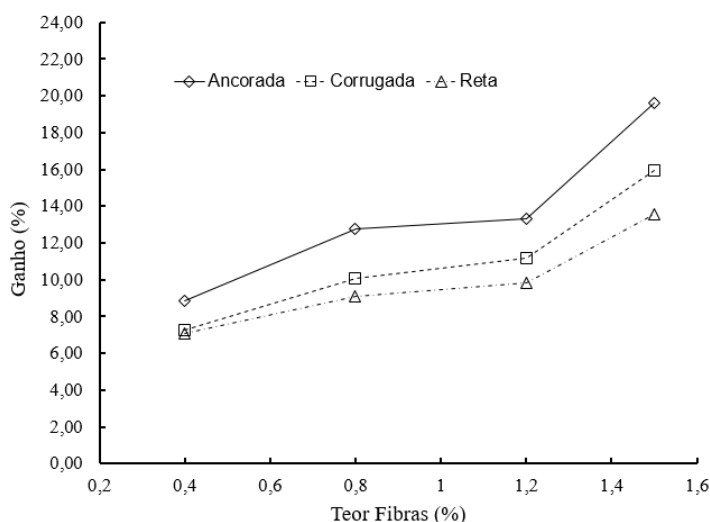


Figura 42 – Ganho resistência à compressão 7 dias

Fonte: Autor, 2016.

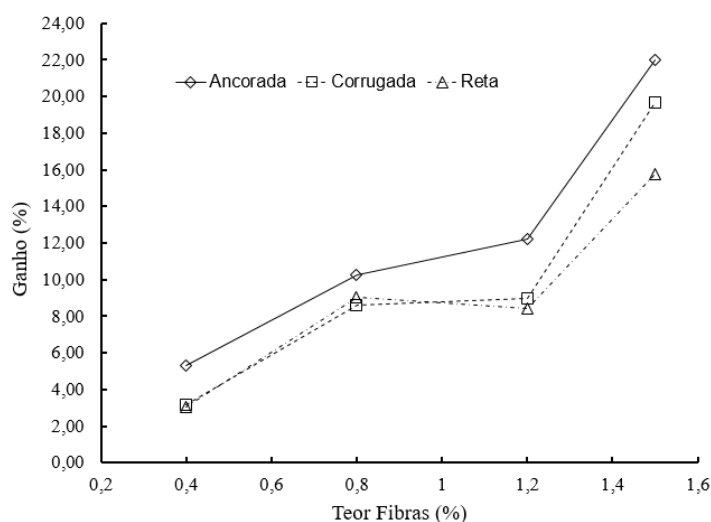


Figura 43 – Ganho resistência à compressão 28 dias
Fonte: Autor, 2016.

O máximo teor foi de 1,5%, e comparando-se os valores médios dos resultados de resistência à compressão, foi possível passar de 44,67 MPa (concreto de controle) para 53,43 MPa (1,5% de fibras ancoradas), ou seja, um ganho de 19,62% para a idade de 7 dias. Já para a idade de 28 dias esse ganho foi de 22,01% para a mesma comparação (de 48,52 MPa para 59,20 MPa).

Se para a resistência à compressão, o acréscimo de fibras não impacta em grandes ganhos de resistência, o mesmo não acontece para a resistência à tração. O concreto possui baixa resistência à tração, enquanto que o aço possui uma elevada resistência. O compósito formado entre esses dois materiais, tende a resultar em um com uma resistência à tração maior que a do concreto, entretanto menor que a do aço.

Da mesma forma como realizado para a resistência à compressão, o ensaio de resistência à tração foi realizado nas idades de 7 e 28 dias, e foi empregado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral. Para a fibra ancorada, na idade de 7 dias, foi preciso um teor de 1,2% para ser possível verificar diferença estatística, enquanto que para a idade de 28 dias, essa diferença já foi possível com um acréscimo de 0,8%. Quando adicionado o teor máximo de 1,5%, o mesmo se mostrou diferente estatisticamente de todas as outras misturas, tanto na idade de 7 quanto 28 dias, apresentando um grande ganho de resistência à tração.

Com relação a fibra corrugada, a mesma apresentou um comportamento diferente dos demais, para a idade de 28 dias. A média da resistência de 0,8% foi maior que 1,2%, entretanto, estatisticamente, ambas são iguais. Na idade de 7 dias, com apenas

0,4% de fibras adicionadas, já se tem um ganho de resistência, sendo que para 28 dias foi necessário o incremento de 0,8%. O acréscimo máximo de 1,5% apenas mostrou-se superior estatisticamente para a idade de 28 dias.

Para as fibras retas, na idade de 7 dias foi necessário adicionar 0,8% para apresentar ganho de resistência, sendo que para a quantidade de 1,5% não se mostrou superior que quando incorporados 1,2%. Já para a idade de 28 dias, foi necessário apenas 0,4% de adição para esse ganho, e o teor máximo se mostrou diferente de todos os outros demais.

O ACI 544 1R (1996) cita que quando incorporada a fração volumétrica de 1,5% de fibras, o ganho de resistência à tração fica entre 30% e 40%. Oliveira (2007) conseguiu um aumento de 83%. Araújo (2002) quando adicionou 1,5% teve melhoras de mais de 87%, enquanto que Nunes (2006), com 2,0 % de teor de fibras, chegou a ganhar 104% de resistência. A pesquisa em questão, para a idade de 7 dias obteve uma melhora de 74,63% na resistência à tração (4,04 MPa para 7,07 MPa com incorporação de 1,5%), e um ganho de 87,85% para a idade de 28 dias da mesma mistura (4,23 MPa para 7,94 MPa), conforme mostram as Figuras 44 e 45:

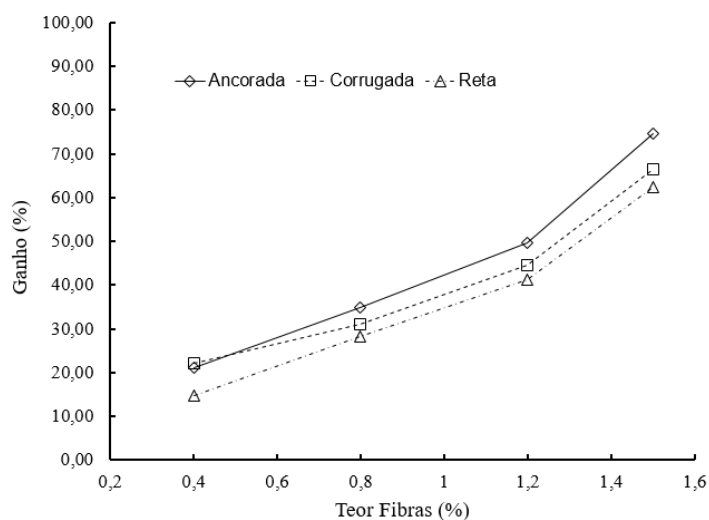


Figura 44 – Ganho resistência à tração 7 dias
Fonte: Autor, 2016.

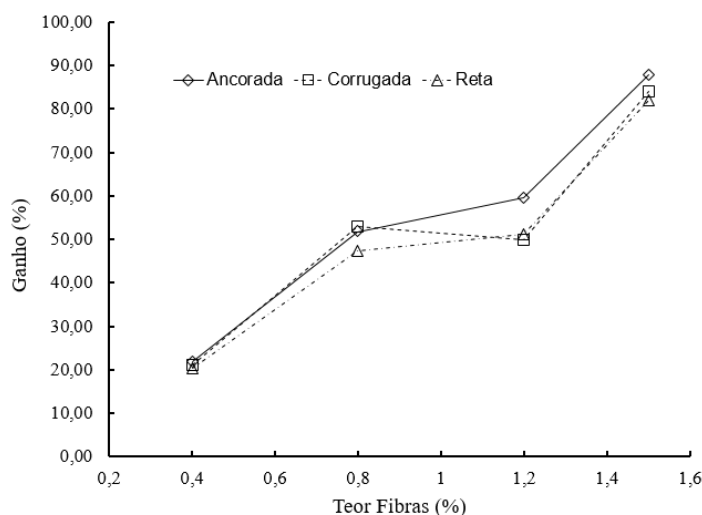


Figura 45 – Ganho resistência à tração 28 dias
Fonte: Autor, 2016.

O módulo de elasticidade correlaciona a deformação que um material sofre quando submetido a determinada tensão. O mesmo pode ser associado também, a caracterizar um material como sendo frágil, ou dúctil. O concreto caracteriza-se por ser um material frágil enquanto que o aço é um material dúctil. Um composto formado por dois materiais distintos, tende a resultar em um material “pseudo – dúctil”, onde o mesmo sofrerá maiores deformações antes de sua ruptura.

O comportamento do módulo de elasticidade para as misturas com fibra de aço, se deu de forma semelhante as demais características mecânicas anteriormente citadas. Para a fibra ancorada, na idade de 7 dias, foi necessário um teor de 0,8% para se ter uma diferença estatística quando comparado o concreto sem fibras. Já para a idade de 28 dias, essa diferença foi obtida com apenas 0,4%. Quando analisado o teor máximo de 1,5%, apenas para 28 dias o mesmo apresenta diferença significativa para os demais teores.

As fibras corrugada e reta apresentaram comportamento semelhante à ancorada, precisando de 0,4% para apresentar diferença em 28 dias e 0,8% de fibras para a idade de 7 dias. Entretanto para a fibra corrugada em ambas as idades, o teor máximo de 1,5% não obteve diferença estatística quando comparado com o teor de 1,2%, enquanto que para a reta houve.

Enquanto que o ensaio de resistência à compressão apresentou um maior ganho de 22,01% (comparando as médias dos resultados do concreto sem fibras com o concreto com 1,5% de fibras) na idade de 28, o ensaio de resistência à tração também nessa mesma idade teve um ganho de 87,85% (fazendo as mesmas comparações), o ensaio de módulo de elasticidade, apresentou maior ganho para a idade de 7 dias, um acréscimo de 36,12%

(de 25,61 GPa para 34,86 GPa), enquanto que para 28 dias, essa diferença foi de 31,34% (27,11 GPa para 35,61 GPa). Ou seja, apresentou ganhos mais expressivos quando comparado com a resistência à compressão, porém em menor escala quando analisada a resistência à tração, como é possível observar através das Figuras 46 e 47:

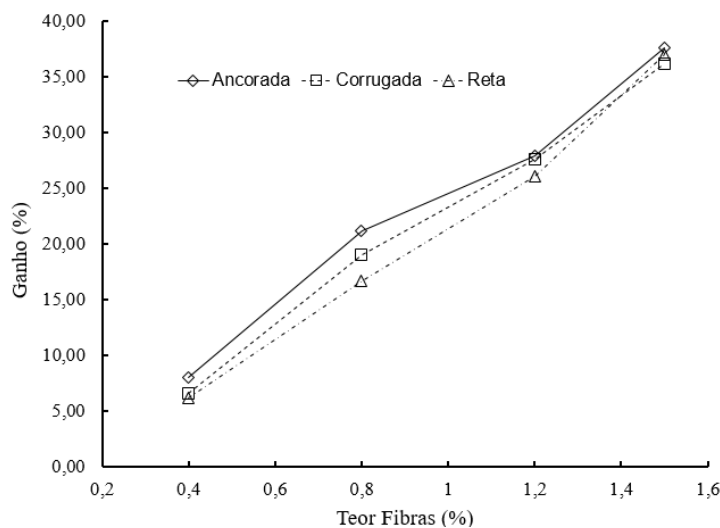


Figura 46 – Ganho módulo de elasticidade 7 dias
Fonte: Autor, 2016.

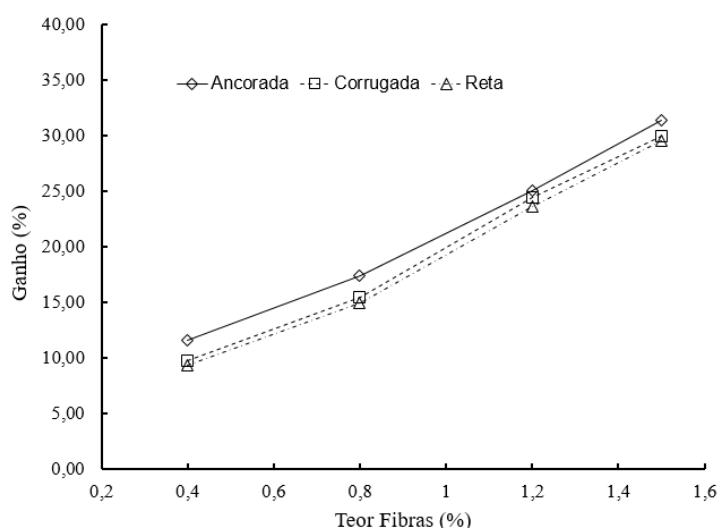


Figura 47 – Ganho módulo de elasticidade 28 dias
Fonte: Autor, 2016.

A resistência à compressão, tração e módulo de elasticidade, são características determinadas através de ensaios estáticos. A fadiga, entretanto, necessita de um ensaio dinâmico para a sua determinação. O ensaio empregado para o trabalho em questão, não é normatizado, porém utiliza dos princípios associados a fadiga de um determinado material (ruptura por carregamento cíclico). Cada amostra foi submetida a ciclos de carga

e descarga, todas na mesma frequência e mesma amplitude, para que então pudesse ser analisado a deformação sofrida pelo material.

Ao contrário dos demais ensaios, o ensaio de fadiga foi realizado apenas para a idade de 28 dias. Na fibra ancorada, para obter uma diferença estatística quando comparado com o concreto de referência, foi necessário o emprego de 0,8%, teor esse que não obteve essa diferença estatística, quando comparado com o teor de 1,2%. Já quando incorporado o máximo teor de 1,5%, o ganho comparado ao concreto de referência foi de 104,39% (11380 ciclos para 23260 ciclos).

A fibra corrugada precisou de uma incorporação de 1,2% para apresentar diferença estatística do concreto sem fibras, enquanto que esse teor, apresentou semelhança quando comparado ao teor de 1,5%. Teor esse, que proporcionou um ganho 99,47%, fazendo com que passasse dos mesmos 11380 ciclos (concreto sem fibras) para a quantia de 22700 ciclos.

A Figura 48 mostra essa melhora na resistência à fadiga do concreto:

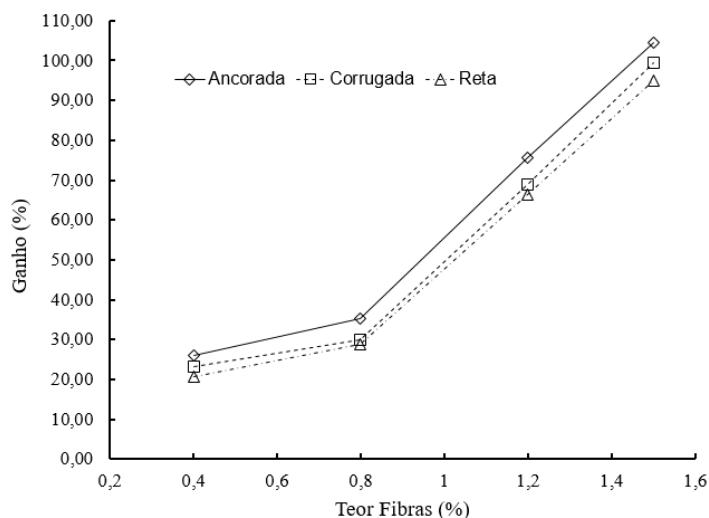


Figura 48 – Ganho resistência à fadiga 28 dias

Fonte: Autor, 2016.

Assim como ocorrido para a fibra corrugada, a fibra reta também necessitou uma adição de um teor de 1,2% para obter diferença estatística em relação ao concreto de controle. Com relação a mistura que contém 1,5%, a média dos valores obtidos foram 94,90% maior que a mistura sem fibras, elevando a quantidade de ciclos de 11380 para 22180 ciclos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento do concreto autoadensável em seu estado plástico e endurecido, quando incorporados diferentes tipos de fibras aço, com diferentes teores. Sendo assim, pode-se obter as seguintes conclusões:

A incorporação das fibras de aço no concreto autoadensável, em seu estado plástico, reduz sua fluidez e sua habilidade passante, na proporção direta do aumento do teor de fibras, sendo pouco relevante o efeito do tipo de fibra. Esse fato pode ser observado através dos ensaios de espalhamento, t_{500} e Anel J. Apesar dessa redução, todas as misturas foram enquadradas dentro do que especifica a NBR 15823-1 (ASSOCIAÇÃO..., 2010) e a NBR 15823-3 (ASSOCIAÇÃO..., 2010). Quando analisados esses ensaios, as misturas com 1,2% e 1,5% de fibras incorporadas, tem seu uso restrito a elementos como vigas e pilares, não sendo indicados a elementos esbeltos como paredes diafragma e pilar parede, sendo que as demais (concreto de controle e mistura com 0,4% e 0,8%) não sofrem essa restrição. Ou seja, para a faixa de incorporação de fibras de 0,4% a 1,5%, o concreto permaneceu como sendo considerado autoadensável, porém à medida que o teor vai aumentando, a trabalhabilidade vai diminuindo de forma gradativa. Já com relação ao tipo de fibra, não existe diferenças significativas entre elas, ou seja, é como se não fossem diferentes para efeito da fluidez.

Quando analisado o concreto autoadensável em seu estado endurecido, suas propriedades mecânicas tiveram alteração, dependendo do teor de fibras incorporado, e assim como no estado plástico, sem alterações decorrentes da variação do tipo de fibra. A resistência à compressão foi a característica menos afetada pela incorporação das fibras. Tal fato pode ser associado a questão da ação da fibra ocorrer somente depois da fissuração, e mesmo que o ganho seja pouco, pode ser associado ao fato da fibra amenizar a propagação das fissuras.

Em relação ao módulo de elasticidade, o ganho não se compara com o ganho das resistências à tração e à fadiga, entretanto, obteve um aumento considerável, já para os teores de 0,4% e 0,8%. Quando analisado a mistura com o máximo de teor incorporado, esse aumento de valor de módulo de elasticidade chegou a 36,12%. Esse aumento pode ser associado a combinação de materiais com baixo valor de módulo (concreto na faixa de 25 GPa) com alto valor de módulo (aço na faixa de 200 GPa). Analisando do ponto de vista estrutural, esse aumento no valor do módulo de elasticidade, resulta em menores flechas/deformações, possibilitando assim maiores vãos.

As estruturas em concreto armado, necessitam de aço justamente pelo fato da resistência do concreto à tração ser baixa, dessa forma, nas regiões onde o esforço de tração é maior, faz-se necessário o emprego da armadura de aço. A incorporação de fibras de aço, proporcionou um ganho elevado de resistência à tração, ganho esse que chegou aos 87,85%. Esse aumento pode ser associado, com o fato da propagação das fissuras ter um impacto maior na resistência à tração, do que na resistência à compressão por exemplo. Outro fator que pode ser analisado cuidadosamente, é a possibilidade de uma redução da armadura de aço, uma vez que a própria resistência do concreto à tração, tem um valor mais elevado. Dessa forma, o que a princípio é um custo maior na produção do concreto com fibras, pode resultar em uma economia em aço.

O ensaio que obteve maiores ganhos quando comparado o concreto de controle (sem fibras), com as demais misturas com fibras, foi o de fadiga. Ressalta-se a questão de que o ensaio realizado não foi normatizado (diferente de todos os outros demais), porém as condições impostas as misturas, foram o que caracterizam a fadiga em si, ou seja, cargas cíclicas aplicadas até que o material rompesse, ou se deformasse até certo ponto. Assim como analisado na tração, o concreto sem fibras tem baixa resistência à fadiga. Existem algumas situações em que o concreto pode ser exposto a esse tipo de esforço, como são os casos de pisos industriais, pistas de aeroporto, dormentes de trem, dentre outros. Por essa razão, como foi possível elevar a quantidade de ciclos em mais de 104%, o emprego de fibras de aço em concretos autoadensáveis, pode ser uma solução, tanto para a redução de fissuras, como para aumentar o tempo de vida útil da estrutura.

Por último, com posse de todos os resultados, a análise estatística pode servir como argumento matemático para poder afirmar ou não diferenças existentes entre os teores empregados. Para todos os ensaios realizados, em pelo menos uma das idades, o teor de 1,2% se mostrou estatisticamente igual ao teor de 1,5% (mesmo esse teor apresentando valores médios superior em todos os ensaios). Assim, é possível obter mesmos resultados, empregando um teor menor de fibras, o que acarreta um custo menor. Já com relação aos teores mínimos empregados de 0,4% e 0,8%, para a maioria dos ensaios realizados, foi necessário empregar o teor de 0,8% para assim obter diferença estatística quando comparado com o concreto sem fibras.

Dessa forma, é possível concluir de que é viável incorporar fibras de aço em concretos autoadensáveis, sem que os mesmos percam a característica de autoadensabilidade, cuidando a aplicação, para assim limitar ou não o teor empregado. Dependendo a finalidade onde exista a necessidade de características mecânicas elevadas,

e uma trabalhabilidade mais baixa, mas ainda se enquadrando como autoadensável, teores mais elevados podem ser empregados. Já quando a aplicação necessitar de trabalhabilidade maior, é possível empregar teores menores, e ainda assim obter ganhos em suas propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ACCETTI K. M., Pinheiro L. M. **Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras**. 42º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, IIA-25: Fortaleza, Brasil; 2000.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part 5**. ACI. Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete. (ACI 544.3R-93). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1993. 10p.

_____. **Report on fiber reinforced concrete**. (ACI 544.1R-96). ACI Committee 544. Detroit, USA, 1996.

ARAÚJO D. L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldadas ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho**. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP: 319 p.; São Paulo, Brasil; 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregado para concreto. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo de elástico de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 11768**: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 15530**: Fibras de aço para concreto – Especificações. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 15823-1**: CAA – Classificação controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15823-2**: CAA – CAA - Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15823-3**: CAA – CAA - CAA - Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto Parte I - Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 16372**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR NM 23**: Cimento portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 33**: Concreto - Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 46**: Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem, Rio de Janeiro, 2003.

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

_____. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

AVESTON, J.; COOPER, G. A.; KELLY, A. **Single and multiple fracture. In: Conference on the Properties of Fiber Composites.** London, 1971. Proceedings. NPL. p.15-26.

BALAGURU, P. N., SHAH, S. P. **Fiber-Reinforced Cement Composites**, International Edition, 1992.

BARROS, Alexandre Rodrigues de. **Avaliação do Comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçadas com fibras de aço.** 2009. 8p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.

BENTUR, A., MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites.** 2nd Edition, Modern Concrete Technology Series, 2007.

BILLBERG, P. **Self-compacting concrete for civil engineering structures – The Swedish experience.** S.C.C.R.I., Stockholm, pp. 1-77, 1999.

CALLISTER W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais. Uma introdução.** 5ª Edição, Editora LTC: 589 p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2002.

CHENKUI, H.; GUOFAN, Z. **Properties of steel fibre reinforced concrete containing larger coarse aggregate.** Cement and Concrete Composites. Vol. 17. p. 199-206, 1995.

DOMONE, P. L. **A review of the hardened mechanical properties of selfcompacting concrete.** Cement and Concrete Composites. Vol. 29, p. 12, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto Reforçado com Fibras.** Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON. Volume 2, 2011.

FIGUEIREDO, A.D.; CECCATO, M.R. e TORNERI, P. **Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço.** 39a REIBRAC. Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo. 1997. 10p.

GAVA, G. P.; PIERI, T. S.; PRUDÊNCIO JR., L. R. **Ensaio de flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço: influência da presença e posicionamento do entalhe e do número de fibras na seção fissurada.** e-Mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1, n. 2, p. 114-127, 2004.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete.** 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

GOMES, P. C. C., BARROS, A. R., **Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável.** 1ª Edição São Paulo: Editora Pini LTDA, 2009.

GOMES, P. C. C.; CAVALCANTI, D. J. H.; BARROS, A. R.; BARBOZA, A. S. R.; LIMA, F. B. (2006) **Propriedades mecânicas de concreto auto-adensável**. In: XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural. 10 f. XXXII Jornadas Sulamericanas de Engenharia Estrutural, Campinas, São Paulo.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI Editora. São Paulo, 1992.

HEBBELER, R. C., **Resistência dos Materiais**. 7ª Edição São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

HOLSCHEMACHER, K. **Hardened material properties of self compacting concrete**. Journal of Civil Engineering and Management, v. 0, n.4, p. 261, 2004.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 115p. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós- Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

LI, V. C.; MATSUMOTO, T. **Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation**. Cement & Concrete Composites, v.20, 1998., p351.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese de Doutorado, PUC – RJ: 201 p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2012.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Edição São Paulo: Editora Pini LTDA, 2008.

NAAMAN, A. E.; HAMMOND, H. **Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete**. Cement & Concrete Composites, v.20, 1998., p363.

NEHDI, M.; LADANCHUK, J. D. **Fiber synergy un Fiber-Reinforced Self-Consolidating**. ACI – Materials Journal/November-December 2004. 101-M57. Pg. 508-517.

NUNES, Sandra Conceição Barbosa. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades.** Dissertação Mestrado. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2001.

NUNES G. T. N. **Análise experimental de vigas de concreto reforçado com fibras de aço submetidas a esforços de cisalhamento.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás: 219 p.; Goiânia, Brasil; 2006.

Oliveira C. A. S. Avaliação da redução de armadura mínima de flexão em vigas de concreto armado com adição de fibras de aço. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás: 234 p.; Goiânia, Brasil; 2007.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete.** Journal of Advanced Concrete Technology, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

OUCHI, M. **Self-compacting concrete – development, applications and investigations.** In: 17th Nordic Concrete Research Symposium. Reykjavik, Iceland, 1999.

PERSSON, B. **A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete.** Cement and Concrete Research. Vol. 31. p. 193-198, 2001.

REPETTE, W. L. **Concreto Autoadensável.** Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON. Volume 2, 2011.

SHINDOH, T.; MATSUOKA, Y. **Development of combination-type selfcompacting concrete and evaluation test methods.** Journal of Advanced Concrete Technology. Vol. 1, p. 26-36, 2003.

SWAMY, R. N. **Evaluation of fibre reinforced cement based composites,** Matériaux et Constructions, v.8, v. 45, 1975.

TESTING-SCC PROJECT – SELF-COMPACTING CONCRETE. **Measurement of properties of fresh self-compacting concrete.** Final Report. Project Co-ordinator: ACM Centre, University of Paisley, UK. September, 2005.

TUTIKIAN, B. F., DAL MOLIN, D. C., **Concreto Autoadensável**. 1ª Edição São Paulo: Editora Pini LTDA, 2008.

VELASCO, R. V. **Concretos autoadensáveis reforçados com elevadas frações volumétricas de fibras de aço: propriedades reológicas, físicas, mecânica e térmicas**. Tese de Doutorado, UFRJ – RJ: 349 p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2008.

WALRAVEN, J. **Structural applications of self compacting concrete**. In: **RILEM International Symposium on Self Compacting Concrete**, 17 – 20 Aug. 2003, Reykjavik, Iceland. Proceedings... Wallevik, O.; Nielson, I. (Ed.). Bagnaux, France RILEM Publications PRO 33, 2003.

APÊNDICE A – GRANULOMETRIA AREIA NATURAL

Tabela 21 – Granulometria areia

Peneiras # (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Variação (%)	Médias	
	Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		% retida	% retida acumulada
9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
6,30	1,35	0,23	1,99	0,34	0,11	0,28	0
4,80	0,74	0,12	1,18	0,20	0,08	0,16	0
2,40	5,22	0,88	4,46	0,75	0,13	0,82	1
1,20	31,82	5,36	26,25	4,44	0,92	4,90	6
0,600	105,30	17,75	99,98	16,91	0,84	17,33	23
0,300	253,39	42,71	246,62	41,71	1,01	42,21	65
0,150	179,71	30,29	189,83	32,10	1,81	31,20	97
Fundo	15,69	2,64	20,98	3,55	0,90	3,10	100

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE B – GRANULOMETRIA BRITA

Tabela 22 – Granulometria brita

Peneiras # (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Variação (%)	Médias	
	Massa retida (g)	% retida	Massa retida (g)	% retida		% retida	% retida acumulada
12,70	7,12	0,62	0,00	0,00	0,62	0,31	0
9,50	29,93	2,63	63,13	4,34	1,71	3,49	4
6,30	499,00	45,06	603,02	43,38	1,67	44,22	48
4,80	377,16	32,95	482,62	33,21	0,26	33,08	81
2,40	228,02	19,92	300,99	20,71	0,79	20,32	100
1,20	1,27	0,11	1,96	0,13	0,02	0,12	100
0,600	0,35	0,03	0,25	0,02	0,01	0,02	100
0,300	0,49	0,04	0,22	0,02	0,03	0,03	100
0,150	0,65	0,06	0,24	0,02	0,04	0,04	100
Fundo	0,55	0,05	0,72	0,05	0,00	0,05	100

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE C – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 7 DIAS

Tabela 23 – Resistência à compressão 7 dias

7 Dias	Ancorada				Corrugada				Reta			
	Teor	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
0,00%	45,48	44,67	0,61	1,37%	45,48	44,67	0,61	1,37%	45,48	44,67	0,61	1,37%
	44,53				44,53				44,53			
	44,00				44,00				44,00			
0,40%	48,15	48,62	0,46	0,95%	48,54	47,92	0,59	1,23%	47,33	47,82	0,45	0,95%
	48,46				48,09				47,72			
	49,25				47,12				48,42			
0,80%	50,18	50,38	0,36	0,72%	49,12	49,18	0,38	0,78%	48,94	48,75	0,34	0,70%
	50,08				49,67				49,03			
	50,89				48,74				48,27			
1,20%	50,94	50,63	0,25	0,50%	49,43	49,66	0,41	0,83%	48,38	49,07	0,56	1,14%
	50,62				49,33				49,08			
	50,32				50,24				49,76			
1,50%	53,74	53,43	0,83	1,56%	51,04	51,80	0,61	1,18%	51,15	50,72	0,37	0,73%
	54,27				51,81				50,78			
	52,29				52,55				50,24			

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE D – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO 28 DIAS

Tabela 24 – Resistência à compressão 28 dias

28 Dias	Ancorada				Corrugada				Reta			
	Teor	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
0,00%	47,58	48,52	0,67	1,38%	47,58	48,52	0,67	1,38%	47,58	48,52	0,67	1,38%
	49,07				49,07				49,07			
	48,92				48,92				48,92			
0,40%	50,03	51,10	0,91	1,77%	50,24	50,05	0,68	1,37%	49,47	50,00	0,46	0,93%
	52,24				50,78				49,95			
	51,03				49,13				50,60			
0,80%	53,49	53,50	0,21	0,39%	52,06	52,70	0,46	0,87%	52,92	52,92	0,70	1,33%
	53,76				52,88				53,78			
	53,25				53,15				52,06			
1,20%	53,78	54,44	0,47	0,87%	52,84	52,89	0,32	0,60%	52,20	52,61	0,68	1,30%
	54,85				53,30				53,58			
	54,70				52,52				52,06			
1,50%	59,07	59,20	0,56	0,94%	58,79	58,08	0,68	1,16%	57,24	56,18	0,75	1,34%
	58,59				58,29				55,58			
	59,94				57,17				55,73			

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE E – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 7 DIAS

Tabela 25 – Resistência à tração 7 dias

7 Dias	Ancorada				Corrugada				Reta				
	Teor	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação
0,00%	3,79					3,79				3,79			
	4,16	4,05	0,18	4,56%	4,16	4,05	0,18	4,56%	4,16	4,05	0,18	4,56%	
	4,20				4,20				4,20				
0,40%	4,64				4,87				4,74				
	4,82	4,90	0,25	5,12%	5,01	4,95	0,06	1,19%	4,66	4,64	0,09	1,87%	
	5,24				4,97				4,53				
0,80%	5,03				5,10				5,01				
	5,77	5,46	0,31	5,76%	5,47	5,31	0,15	2,90%	5,22	5,20	0,14	2,77%	
	5,58				5,35				5,36				
1,20%	6,28				5,46				6,07				
	6,04	6,06	0,17	2,78%	6,22	5,85	0,31	5,32%	5,92	5,72	0,40	6,97%	
	5,87				5,87				5,16				
1,50%	6,88				6,21				6,14				
	7,19	7,07	0,14	0,02	6,96	6,74	0,38	5,63%	6,35	6,58	0,48	7,24%	
	7,14				7,06				7,24				

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE F – ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO 28 DIAS

Tabela 26 – Resistência à tração 28 dias

28 Dias	Ancorada				Corrugada				Reta			
	Teor	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
0,00%	4,09	4,23	0,13	3,06%	4,09	4,23	0,13	3,06%	4,09	4,23	0,13	3,06%
	4,19				4,19				4,19			
	4,40				4,40				4,40			
0,40%	5,45	5,15	0,22	4,19%	5,24	5,12	0,24	4,63%	4,94	5,08	0,13	2,59%
	5,07				5,33				5,05			
	4,94				4,79				5,26			
0,80%	6,76	6,42	0,29	4,54%	6,03	6,46	0,31	4,74%	6,00	6,23	0,25	3,93%
	6,05				6,64				6,12			
	6,44				6,71				6,57			
1,20%	6,78	6,75	0,08	1,17%	6,04	6,33	0,27	4,24%	6,12	6,39	0,24	3,79%
	6,82				6,26				6,35			
	6,64				6,69				6,71			
1,50%	7,85	7,94	0,08	1,02%	7,51	7,78	0,19	2,44%	7,83	7,69	0,15	1,99%
	7,93				7,94				7,77			
	8,04				7,88				7,48			

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE G – ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE 7 DIAS

Tabela 27 – Módulo de elasticidade 7 dias

7 Dias	Ancorada				Corrugada				Reta			
	Teor	Individual (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão
0,00%	24,78	25,33	0,39	1,56%	24,78	25,33	0,39	1,56%	24,78	25,33	0,39	1,56%
	25,67				25,67				25,67			
	25,55				25,55				25,55			
0,40%	27,24	27,36	0,40	1,45%	26,87	27,01	0,15	0,56%	26,56	26,90	0,39	1,47%
	27,89				26,94				27,45			
	26,94				27,22				26,68			
0,80%	30,04	30,70	0,49	1,59%	30,88	30,16	0,51	1,70%	30,10	29,57	0,43	1,46%
	31,20				29,74				29,04			
	30,86				29,85				29,56			
1,20%	32,14	32,40	0,19	0,59%	32,68	32,32	0,42	1,29%	31,80	31,94	0,38	1,18%
	32,58				31,74				31,56			
	32,49				32,55				32,45			
1,50%	34,89	34,86	0,14	0,41%	34,43	34,50	0,29	0,84%	35,04	34,70	0,30	0,86%
	34,67				34,18				34,74			
	35,02				34,88				34,31			

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE H – ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE 28 DIAS

Tabela 28 – Módulo de elasticidade 28 dias

28 Dias	Ancorada				Corrugada				Reta			
	Teor	Individual (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Individual (GPa)	Média (GPa)	Desvio Padrão
0,00%	27,02	27,11	0,24	0,89%	27,02	27,11	0,24	0,89%	27,02	27,11	0,24	0,89%
	26,87				26,87				26,87			
	27,44				27,44				27,44			
0,40%	29,47	30,26	0,57	1,87%	30,29	29,76	0,37	1,26%	29,12	29,65	0,39	1,30%
	30,76				29,54				29,79			
	30,55				29,46				30,03			
0,80%	31,48	31,84	0,27	0,85%	31,05	31,31	0,33	1,06%	30,79	31,16	0,27	0,87%
	32,14				31,11				31,24			
	31,89				31,78				31,44			
1,20%	33,54	33,90	0,28	0,81%	33,78	33,73	0,29	0,85%	33,45	33,50	0,13	0,38%
	33,95				33,35				33,68			
	34,21				34,05				33,38			
1,50%	35,02	35,61	0,46	1,29%	35,41	35,24	0,32	0,90%	34,94	35,12	0,16	0,46%
	35,66				35,51				35,08			
	36,14				34,79				35,33			

Fonte: Autor, 2016.

APÊNDICE I – FADIGA 28 DIAS

Tabela 29 – Fadiga 28 dias

28 Dias		Ancorada			Corrugada				Reta			
Teor	Ciclos (n°)	Média (n°)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Ciclos (n°)	Média (n°)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação	Ciclos (n°)	Média (n°)	Desvio Padrão	Coefficiente Variação
0,00%	1,056 x 10 ⁴				1,056 x 10 ⁴				1,056 x 10 ⁴			
	1,23 x 10 ⁴	1,138 x 10 ⁴	713,86	6,27%	1,23 x 10 ⁴	1,138 x 10 ⁴	713,86	6,27%	1,23 x 10 ⁴	1,138 x 10 ⁴	713,86	6,27%
	1,128 x 10 ⁴				1,128 x 10 ⁴				1,128 x 10 ⁴			
0,40%	1,332 x 10 ⁴				1,314 x 10 ⁴				1,374 x 10 ⁴			
	1,506 x 10 ⁴	1,434 x 10 ⁴	741,35	5,17%	1,41 x 10 ⁴	1,402 x 10 ⁴	688,19	4,91%	1,446 x 10 ⁴	1,374 x 10 ⁴	587,88	4,28%
	1,464 x 10 ⁴				1,482 x 10 ⁴				1,302 x 10 ⁴			
0,80%	1,494 x 10 ⁴				1,434 x 10 ⁴				1,404 x 10 ⁴			
	1,518 x 10 ⁴	1,54 x 10 ⁴	490,71	3,19%	1,596 x 10 ⁴	1,478 x 10 ⁴	843,33	5,71%	1,452 x 10 ⁴	1,466 x 10 ⁴	572,01	3,90%
	1,608 x 10 ⁴				1,404 x 10 ⁴				1,542 x 10 ⁴			
1,20%	1,896 x 10 ⁴				1,812 x 10 ⁴				1,848 x 10 ⁴			
	1,944 x 10 ⁴	1,998 x 10 ⁴	1120,36	5,61%	1,908 x 10 ⁴	1,922 x 10 ⁴	960,42	5,00%	1,866 x 10 ⁴	1,892 x 10 ⁴	500,40	2,64%
	2,154 x 10 ⁴				2,046 x 10 ⁴				1,962 x 10 ⁴			
1,50%	2,382 x 10 ⁴				2,226 x 10 ⁴				2,364 x 10 ⁴			
	2,412 x 10 ⁴	2,326 x 10 ⁴	1011,53	4,35%	2,328 x 10 ⁴	2,27 x 10 ⁴	428,02	1,89%	2,208 x 10 ⁴	2,218 x 10 ⁴	1153,43	5,20%
	2,184 x 10 ⁴				2,256 x 10 ⁴				2,082 x 10 ⁴			

Fonte: Autor, 2016.

