

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
FORTIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO**

**FELIPE DE CARVALHO LAGE  
GEDALIAS CELEDONIO ROCHA**

**RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL COM FIBRAS DE AÇO**

**Rio de Janeiro  
2019**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FELIPE DE CARVALHO LAGE  
GEDALIAS CELEDONIO ROCHA**

**RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL COM FIBRAS DE AÇO**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia.

Orientadores: Prof. Fábio Grisolia de Ávila, D. Sc.  
Prof.<sup>a</sup> Rebeca Montenegro Dias de  
Carvalho Saraiva, D.Sc.

**Rio de Janeiro  
2019**

©2019

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmar ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade dos autores e dos orientadores.

LAGE, Felipe de Carvalho; e  
ROCHA, Gedalias Celedonio.

Resistência à fadiga na flexão de vigas de concreto autoadensável com fibras de aço / Gedalias Celedonio Rocha; Felipe de Carvalho Lage. — Rio de Janeiro, 2019. 72 f.

Orientadores: Fábio Grisolia de Ávila; Rebeca Montenegro Dias de Carvalho Saraiva.

Projeto Final de Curso (graduação) — Instituto Militar de Engenharia, Bacharel em Engenharia de Fortificação e Construção, 2019.

1. Engenharia de Fortificação e Construção - Projeto de Final de Curso. 2. Concreto Autoadensável. 3. Tecnologia das Construções. 4. Resistência à fadiga na flexão de vigas de concreto autoadensável com fibras de aço. I. Lage, Felipe de Carvalho. II. Ávila, Fábio Grisolia de, orient. III. Saraiva, Rebeca Montenegro Dias de Carvalho, orient. IV. Título

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**FELIPE DE CARVALHO LAGE  
GEDALIAS CELEDONIO ROCHA**

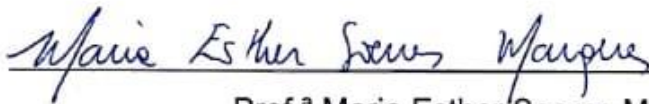
**RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO  
AUTOADENSÁVEL COM FIBRAS DE AÇO**

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Fortificação e Construção do Instituto Militar de Engenharia.

Orientadores: Prof. Fábio Grisolia de Ávila, D. Sc.

Prof.<sup>a</sup> Rebeca Montenegro Dias de Carvalho Saraiva, D.Sc.

Aprovado em 14 de Outubro de 2019 pela seguinte banca examinadora:



Prof.<sup>a</sup> Maria Esther Soares Marques, D.Sc.



Prof. Fábio Grisolia de Ávila, D.Sc.



Prof. Renato Chancerini Lefone, M.Sc.



Prof.<sup>a</sup> Rebeca Montenegro Dias de Carvalho Saraiva, D.Sc.

Rio de Janeiro  
2019

## AGRADECIMENTOS

À Deus, engenheiro supremo que a tudo criou e nos deu dom da vida. À espiritualidade amiga, pelas boas inspirações e influência.

Aos nossos pais por todo apoio incondicional, e sem os quais não teríamos chegados até esse momento.

Aos nossos irmãos, que na ausência dos pais, são os que nos orientam, protegem e incentivam.

À família por todo suporte e apoio constante em nossa jornada acadêmica.

A Beatriz Araújo de Melo, pelo auxílio e incentivo na conclusão do trabalho.

Aos nossos orientadores Maj Ávila e Cap Rebeca, por estarem presentes em todas as etapas deste projeto, nos orientando, ensinando e motivando a todo momento.

Ao amigo Fernando Bezerra, pela grande força na realização das concretagens.

Aos amigos, cujo ânimo nos impulsionou nas dificuldades.

Aos integrantes do Laboratório de Materiais de Construção e Concreto do IME, Sgt Gonçalves, que foi imprescindível para sanar todas as dificuldades encontradas, Sgt Dias, que muito nos ajudou a realizar os ensaios, aos Sd Victor Melo, Caires e Oliveira Silva, pelo apoio prestado nas execuções dos ensaios, e à aluna de pós graduação Mariana Borges que nos auxiliou a encontrar o traço necessário para realizar o experimento.

Agradeço também a todos os demais professores, funcionários e alunos do Instituto Militar de Engenharia que contribuíram direta ou indiretamente para conclusão deste projeto.

Aos membros da banca pela gentileza de aceitarem o convite para examinar este trabalho.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....</b>	<b>9</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (CAA).....</b>	<b>15</b>
2.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (CAA).....	15
2.2 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO CAA .....	16
2.3 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO CAA.....	16
2.4 UTILIZAÇÃO DO CAA NO BRASIL E NO MUNDO.....	17
<b>3 MATERIAIS CONSTITUINTES.....</b>	<b>20</b>
3.1 CIMENTO .....	20
3.2 ADIÇÕES MINERAIS .....	21
3.2.1 ADIÇÕES MINERAIS QUIMICAMENTE ATIVAS.....	21
3.2.2 ADIÇÕES MINERAIS SEM ATIVIDADE QUÍMICA.....	22
3.3 AGREGADOS MIÚDOS .....	22
3.4 AGREGADOS GRAÚDOS .....	23
3.5 ADITIVOS.....	24
3.5.1 PLASTIFICANTES E SUPERPLASTIFICANTES.....	24
3.5.2 MODIFICADORES DE VISCOSIDADE .....	26
3.6 ÁGUA.....	26
<b>4 NORMATIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO CAA .....</b>	<b>27</b>
4.1 MÉTODO DO CONE DE ABRAMS .....	27
4.2 MÉTODO DO ANEL J – DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE .....	29
4.3 MÉTODO DA CAIXA L – DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE .....	30
4.4 MÉTODO DA CAIXA U – DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE.....	32
4.5 MÉTODO DO FUNIL V – DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE.....	33

4.6	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO – MÉTODO DA COLUNA DE SEGREGAÇÃO .....	34
4.7	CLASSIFICAÇÃO DO CAA NO ESTADO FRESCO.....	36
4.8	CAA NO ESTADO ENDURECIDO .....	37
<b>5</b>	<b>FADIGA.....</b>	<b>40</b>
5.1	COMPORTAMENTO À FADIGA DO CONCRETO.....	40
5.2	RELAÇÃO DE TENSÃO .....	42
5.3	FREQUÊNCIA DE CARREGAMENTO.....	42
5.4	MODELOS DE FADIGA NA FLEXÃO.....	43
5.5	CONCRETO COM FIBRAS.....	45
5.6	ESTUDO DO CAA E SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	46
5.6.1	MEDEIROS (2012) .....	47
5.6.2	SHIMOSAKA (2016).....	50
5.6.3	CAMARGO (2016).....	51
<b>6</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>53</b>
6.1	MATERIAIS EMPREGADOS.....	53
6.1.1	CONCRETO .....	53
6.1.2	FIBRA DE AÇO .....	54
6.2	EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	55
6.2.1	CORPOS DE PROVA.....	55
6.2.2	FÔRMAS .....	56
6.2.3	CONCRETAGEM.....	57
6.3	ENSAIOS.....	58
6.3.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	58
6.3.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	58
6.3.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	59

6.3.4 RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO .....	61
<b>7 RESULTADOS E ANÁLISE.....</b>	<b>62</b>
7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	62
7.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	64
7.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	65
7.4 RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO .....	67
<b>8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	<b>70</b>
<b>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>71</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 2.1 – Foto mostrando arcos feitas de pré-moldados de CAA.....	18
FIG 2.2 – Estrutura em forma de inglu concretada com CAA.....	19
FIG 3.1 – Relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência do CAA ao cisalhamento, onde $\sigma$ é a tensão normal e $\tau$ é a tensão cisalhante.....	23
FIG 3.2 – Etapas de ação do aditivo superplastificantes a base de policarboxilatos.....	25
FIG 4.1 – Desenho esquemático do cone de Abrams.....	27
FIG 4.2 – Foto do cone de Abrams.....	28
FIG 4.3 – Vista em planta do posicionamento do molde.....	29
FIG 4.4 – Anel J em conjunto com o cone de Abrams.....	30
FIG 4.5 – Ilustração do ensaio da caixa L.....	31
FIG 4.6 – Indicação das alturas H1 e H2.....	32
FIG 4.7 – Coluna de segregação.....	33
FIG 4.8 – Aparelhos para o método do funil V.....	34
FIG 4.9 – Coluna de segregação.....	35
FIG 4.10 – Módulo de elasticidade de CAA e CVV em função do teor de argamassa.....	39
FIG. 5.1 – Análise de fadiga: número admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga (com e sem acostamento de concreto) .....	45
FIG. 5.2 – Mecanismos de transferência de tensões entre a matriz e as fibras.....	46
FIG. 5.3 – Sinal senoidal: parâmetros de configuração do ensaio de fadiga.....	47
FIG. 5.4 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto sem fibras C1 .....	48
FIG. 5.5 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de polipropileno C2 .....	49
FIG. 5.6 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de aço C3.....	49
FIG. 5.7 –. Ensaio de fadiga: comparação entre os concretos com e sem fibras...	50
FIG. 6.1 – Geometria da fibra de aço WIRAND®.....	55

FIG. 6.2 – Fôrmas metálicas para os corpos de prova cilíndricos (à esquerda) e de madeira para os prismáticos (à direita).....	56
FIG. 6.3 – Betoneira de 320 litros usada na concretagem .....	57
FIG. 6.4 – Prensa de 1000 kN de capacidade com corpo de prova de concreto ....	58
FIG. 6.5 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral .....	59
FIG. 6.6 – Esquema estrutural das vigas para os ensaios de flexão.....	60
FIG. 6.7 – Ensaio de resistência à tração na flexão.....	60
FIG. 6.8 – Ensaio de fadiga à flexão.....	61
FIG. 7.1 – Corpos de prova de concreto sem fibras de aço após sua ruptura por compressão.....	63
FIG. 7.2 – Corpos de prova de concreto com fibras de aço após sua ruptura por compressão.....	63
FIG. 7.3 – Corpos de prova de concreto sem fibras após sua ruptura por compressão diametral.....	65
FIG. 7.4 – Corpos de prova de concreto com fibras de aço após sua ruptura por compressão diametral.....	65
FIG. 7.5 – Corpo de prova de concreto sem fibras após sua ruptura por flexão.....	66
FIG. 7.6 – Corpo de prova de concreto com fibras de aço após sua ruptura por flexão.....	67

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D_{final}$  – diâmetro final do fluxo

$f$  – frequência de carregamento

$f_c$  – resistência à compressão axial

$f_{crit}$  – frequência crítica para vibrações verticais

$f_{ct,f}$  – resistência à tração na flexão

$f_{ct,sp}$  – resistência à tração por compressão diametral

HP – habilidade passante

L – comprimento do corpo de prova

N – número de ciclos

R – relação entre a tensão mínima aplicada e a resistência à tração na flexão

RT – relação entre a tensão máxima aplicada e a resistência à tração na flexão

SR – resistência à segregação do concreto

$\sigma$  – tensão solicitante

$\sigma_c$  – tensão normal de compressão do concreto

$\sigma_{rup}$  – tensão de ruptura

$\sigma_{ct}$  – tensão tração na flexão do concreto

$V_f$  – teor volumétrico de fibras

## RESUMO

Um dos avanços recentes na tecnologia do concreto é o Concreto Auto Adensável (CAA), desenvolvido pela primeira vez no Japão na década de 80.

O CAA dispensa a vibração e o adensamento do concreto, reduzindo, assim, tanto os gastos de mão de obra quanto o prazo da obra.

A resistência à fadiga na flexão do concreto auto adensável, com ou sem fibras internas dispersas e descontínuas, é um parâmetro importante para o projeto e o dimensionamento de estruturas de concreto, tais como pavimentos rígidos rodoviários, aeroportuários, portuários ou industriais.

As formulações existentes para se avaliar a resistência à fadiga na flexão de concreto auto adensável com fibras são escassas e foram desenvolvidas em outros países, que não levam em conta as propriedades e as características destes concretos produzidos no Brasil.

Este trabalho tem por objetivo determinar as propriedades mecânicas de concreto auto adensável com ou sem fibras, como resistência à compressão, resistência à tração indireta por compressão diametral e por flexão.

Foram ensaiadas 24 vigas de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões, sendo 12 vigas de concreto com 0,50% de teor volumétrico de fibras de aço.

Os ensaios a fadiga foram realizados a uma frequência de carregamento de 5 Hz. Será variada a relação entre a tensão máxima aplicada e a resistência à tração na flexão estática (0,70 e 0,80).

**Palavras chave:** Concreto Auto Adensável, Fibras de Aço, Fadiga.

## ABSTRACT

One of the recent advances in concrete technology is the self-compacting concrete (SCC), developed for the first time in Japan in the decade of 80.

The SCC eliminates the vibration and the density of the concrete, thus reducing both the labor costs and deadline of the work.

The fatigue strength in the bending of self-compacting concrete, with or without scattered and discontinuous internal fibers, is an important parameter for the design and design of concrete structures, such as rigid road, airport, port or industrial floors.

The existing formulations to evaluate the fatigue strength in bending of self-compacting concrete with fibers are scarce and were developed in other countries, which do not take into account the properties and characteristics of these concrete produced in Brazil.

This study aims to determine the mechanical properties of self-compacting concrete with or without fibers, such as compressive strength, indirect tensile strength by diametrical compression and bending.

Twenty-four concrete beams of 100 mm x 100 mm x 400 mm in dimensions were tested, being 12 concrete beams with 0.50% of steel fiber volumetric content.

Fatigue tests were performed at a loading frequency of 5 Hz. The relationship between the maximum applied stress and the tensile strength in static bending (0.70 and 0.80) will be varied.

**Key words:** Self - compacting concrete, Steel Fibers, Fatigue.

## 1 INTRODUÇÃO

Com surgimento no Japão na década de 80, o concreto auto adensável (CAA) começou ser usado no Brasil apenas na primeira década do século 21, acarretando uma defasagem de seu uso em terras brasileiras. Assim, o país possui um déficit de utilização e pesquisas desse inovador tipo de concreto em relação a outros países. Desde então, na tentativa de reverter esse atraso, novos estudos e aplicações do CAA vem sendo desenvolvidos por empresas e universidades de engenharia por todo o Brasil, para comprovar suas qualidades e benefícios em relação ao concreto convencional.

No ímpeto dessas novas pesquisas sobre este material, o objetivo do presente trabalho é verificar o comportamento do concreto auto adensável com fibras de aço na sua composição quando submetido a cargas dinâmicas, ou seja, analisar a sua fadiga. Dessa forma, será possível avaliar o comportamento e sua resistência à fadiga com um incremento na sua composição de fibras de aço (0,5% em volume de fibras de aço), buscando alcançar mais um estudo científico sobre o CAA.

O trabalho será apresentado e subdividido da seguinte maneira: primeiro, a apresentação de uma pesquisa bibliográfica sobre CAA, abordando as definições necessárias, o histórico e as vantagens de sua utilização. Em seguida, o desenvolvimento, no qual será colocado conceitos importantes para a ambientação da pesquisa, contendo a teoria sobre os materiais que compõe o CAA e seus respectivos ensaios de verificação, de resistência à compressão e de resistência à fadiga.

Por fim, realizar-se-á um resumo dos resultados encontrados, analisando-se os gráficos obtidos e finalizando com conclusões referentes ao estudo, buscando, assim, acrescentar mais um estudo sobre o CAA ao catálogo nacional.

## **2 CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (CAA)**

### **2.1 DEFINIÇÃO DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL (CAA)**

Concreto auto adensável é aquele que satisfaz as três propriedades seguintes ao mesmo tempo: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço (ou habilidade passante) e resistência à segregação (EFNARC, 2002 apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 9).

Fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de fluir dentro da fôrma e preencher todos os espaços. Coesão, ou habilidade passante, é a propriedade que caracteriza a capacidade da mistura de escoar pela fôrma, passando por entre as armaduras de aço sem obstrução do fluxo ou segregação. E estabilidade, ou resistência à segregação, é a propriedade que define a capacidade do CAA de se manter coeso ao fluir dentro das fôrmas, passando ou não por obstáculos (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A habilidade do concreto fresco, seja CAA ou não, de preencher as fôrmas sem a presença de bolhas de ar ou falhas de concretagem (ninhos), é um dos principais fatores que influem na qualidade final do concreto endurecido. O CAA não pode depender de nenhum tipo de ajuda externa para cumprir seu papel. O uso de vibradores de imersão, régua vibratórias ou qualquer outra forma de compactação é desnecessária em um CAA. A única ferramenta disponível para esse concreto é seu próprio peso, ou seja, a ação da força da gravidade em sua massa (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Em outras literaturas, o concreto auto adensável é um concreto capaz de fluir e espalhar-se pela fôrma pela ação de seu peso próprio, transpondo obstáculos sem sofrer bloqueios e manter a estabilidade sem sofrer segregação e/ou exsudação de seus componentes, garantindo uma distribuição uniforme dos agregados (SKARENDAHL e PETERSSON, 2000), enquanto para TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008), a primeira grande característica desse material é que é extremamente fluido. Mas, ao mesmo tempo, deve ser capaz de carregar grandes partículas de agregados

gráudos em todo o trajeto. Ou seja, é um concreto que deve unir duas propriedades distintas simultaneamente, ser fluido e viscoso.

Basicamente, a diferença entre a composição dos concretos CCV e a do CAA é o uso de aditivos (superplastificantes e modificadores de viscosidade), juntamente com a diminuição dos agregados gráudos e a adição de materiais finos como areias finas e filers de forma a melhorar a reologia do composto (TUTIKIAN, 2004).

## 2.2 HISTÓRICO E DESENVOLVIMENTO DO CAA

Apesar de o concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo, atualmente não se pode mais considerar apenas o estudo de concretos convencionais (CCV). O mercado e as técnicas construtivas exigem concretos que apresentem características especiais, como os concretos de alta resistência, de alto desempenho, auto adensáveis, com fibras, com altos teores de adições pozolânicas, aparentes, coloridos, brancos e sustentáveis, entre outros (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

Para suprir essa demanda, um avanço na área de tecnologia do concreto tem ocorrido nas últimas décadas. Dentro desse contexto, foi desenvolvido no Japão, em 1988, o concreto auto adensável (CAA), que é capaz de se moldar nas fôrmas por conta própria e preencher, sem necessidade nenhuma de vibração ou compactação externa de qualquer natureza, os espaços destinados a ele (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

## 2.3 VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO CAA

O concreto auto adensável é considerado um dos grandes avanços que ocorreram na tecnologia do concreto. Dentre suas vantagens, podemos destacar as seguintes:



a) Acelera a construção, já que seu lançamento é muito rápido e dispensa adensamento;

b) Reduz a mão de obra no canteiro pois elimina a vibração e facilita o espalhamento e o nivelamento do concreto;

c) Melhora o acabamento final da superfície;

d) Pode aumentar a durabilidade por ser mais fácil de adensar e evita, assim, que ocorram falhas de concretagem e grandes vazios resultantes da má vibração;

e) Permite concretagens em peças de seções reduzidas;

f) Permite grande liberdade de formas e dimensões; o CAA preenche fôrmas curvas, esbeltas, com altas taxas de armadura e de difícil acesso;

g) Torna o local de trabalho mais seguro em função da diminuição do número de trabalhadores; e

h) Permite obter um ganho ecológico porque utiliza em sua composição altos teores de resíduos industriais como cinza volante, escória alto forno ou cinza casca de arroz (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A tecnologia do CAA se adequa à industrialização do processo produtivo de estruturas, proporcionando diminuição do custo da mão-de-obra, melhoria da qualidade e durabilidade das estruturas e maior segurança aos trabalhadores (GOMES, 2009; TUTIKIAN, 2004).

## 2.4 UTILIZAÇÃO DO CAA NO BRASIL E NO MUNDO

DOMONE (2006) fez um levantamento das publicações que relatavam o uso do CAA entre 1993, desde sua primeira aplicação divulgada (no Japão), que foi uma concretagem *in loco* de colunas e paredes de um edifício, e 2003. Podem-se observar diversas curiosidades, dentre elas, que 67% das obras que utilizaram o CAA o fizeram devido às vantagens técnicas do material em comparação ao concreto convencional (CCV), (como a dificuldade de vibração), que 14% usaram o CAA por questões econômicas já que diminuía o número de trabalhadores e do

tempo de construção, por fim, 10% utilizaram o CAA por ele ser um material inovador (apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 12).

As aplicações do CAA foram divididas em dois ambientes: na indústria dos pré-moldados e em obras de concreto moldado *in loco*, sendo que no primeiro ambiente ele é mais desenvolvido devido à sensibilidade a variações em relação ao CCV, que é mais fácil de se encontrar em um ambiente como uma indústria. Uma obra de aplicação da indústria de pré-moldados de CAA são os arcos mostrados na FIG.2.1 (WALRAVEN, 2005 apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).



FIG. 2.1 – Foto mostrando arcos feitas de pré-moldados de CAA. (TUTIKIAN, 2008)

Um exemplo, segundo TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008), de uma obra feita de CAA executada *in situ* é uma estrutura em forma de iglu construída em 1999, que possui 5 m de altura, 11,70 m de largura e 22 m de comprimento, como mostrado na FIG. 2.2. Uma autoestrada em que foi usada o CAA foi em uma ponte em *Vierzon* (França) em 2000.

Embora a tecnologia do CAA tenha sido formulada desde a década de 80, só a partir de 2000 ela começou a ser explorada no Brasil, possuindo, ainda, poucos estudos e material desenvolvido que foque no estudo das propriedades desse material aqui no Brasil.



FIG. 2.2 – Estrutura em forma de iglu concretada com CAA. (TUTIKIAN, 2008)

### **3 MATERIAIS CONSTITUINTES**

Comparado com o concreto convencional, o CAA possui uma composição diferenciada para lhe dar as características necessárias para ele ser considerado auto adensável, tais como a maior quantidade de finos, materiais pozolânicos e superplastificantes.

Os superplastificantes permitem alcançar alta fluidez nas misturas, já os aditivos modificadores de viscosidade atuam aumentando a estabilidade, evitando a exsudação e segregação no concreto (ABESC, 2011 apud LUCAS e SARAIVA, 2014, p. 16).

Devido às exigências reológicas especiais do CAA, as adições são usadas para melhorar e manter a trabalhabilidade, como também regular a quantidade de cimento, reduzindo o calor de hidratação. As adições podem melhorar significativamente a durabilidade do concreto, cujas mais usadas são a cinza volante, a sílica ativa, a escória granulada de alto forno, o fíler de vidro moído, o pó de pedra e o pigmento (ILIESCU, 2007 apud LUCAS e SARAIVA, 2014, p. 16).

Por fim, algumas considerações acerca dos materiais constituintes do CAA serão apresentadas a seguir, levando-se em conta que esses materiais no estado fresco são bem mais sensíveis a variações de qualidade e uniformidade do que os materiais que constituem o concreto convencional.

#### **3.1 CIMENTO**

Não existem critérios científicos que especifiquem o cimento mais adequado para CAA, mas sabe-se que o melhor cimento é o que apresenta a menor variabilidade em termos de resistência à compressão, assim, será empregado o CP V – A.R.I como o cimento que constituiu todos os corpos de provas que foram utilizados nesse trabalho.

Em se tratando de granulometria, sabe-se que quanto mais finas as partículas de cimento, maior será sua superfície específica, que resulta em mais partículas em contato com a água, aumentando a fluidez.

Para GJORV (1992) a necessidade de água e trabalhabilidade da mistura atribuem importância ao tipo de cimento, no que tange à reologia de um cimento. A medida de reologia de um concreto é determinada pelo controle do aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), por meio da formação de etringita. Assim, quanto menor for a quantidade de  $C_3A$ , mais fácil será o controle reológico, além do enrijecimento da mistura durar um período mais longo (apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 28).

### 3.2 ADIÇÕES MINERAIS

Para aumentar a coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo, normalmente são utilizados aditivos modificadores e/ou adições minerais. Estas devem ser escolhidas após uma análise técnica e econômica e podem ser diversas, desde que tenham áreas superficiais de contato maiores que as do componente que estão substituindo (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

As adições minerais serão melhor descritas a seguir separando-se as que possuem atividade química ativa das que não possuem atividade química ativa.

#### 3.2.1 ADIÇÕES MINERAIS QUIMICAMENTE ATIVAS

Adições minerais quimicamente ativas podem ser tanto material pozolânico como material cimentante.

O material pozolânico é definido pela NBR 12653 (2014) como um material que reage quimicamente com o  $Ca(OH)_2$ , produto da hidratação do cimento Portland à temperatura ambiente para formar compostos resistentes, assim, vê-se que ele depende do cimento Portland para atuar, são exemplos: cinza volante e pozolana natural.

O material cimentante, por outro lado, possui o  $\text{Ca(OH)}_2$  na sua composição, não necessitando do produto gerado do cimento Portland para gerar C-S-H, entretanto sua auto-hidratação é lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para a aplicação do material para fins estruturais. Quando é usada como adição ou substituição em concretos de cimento Portland, a presença do  $\text{Ca(OH)}_2$  e gipsita acelera sua hidratação, como é o caso da escória de alto forno (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

### 3.2.2 ADIÇÕES MINERAIS SEM ATIVIDADE QUÍMICA

O fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação é o empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento, eles devem entrar substituindo parte do agregado miúdo, pois apresenta maior finura que esse, melhorando as condições de compactação do esqueleto granular e coesão da mistura. Calcário e a areia fina são os mais tradicionais fílers usados para a produção do CAA (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

### 3.3 AGREGADOS MIÚDOS

Todas as areias são adequadas para a produção do CAA, podendo-se utilizar areias naturais ou areias obtidas industrialmente. As areias naturais são mais adequadas devido ao fato de serem mais arredondadas e possuírem textura mais lisa, assim deixando a mistura mais fluida para uma mesma quantidade de água. Deve-se tomar cuidado ao utilizar areias industriais pois elas costumam apresentar composição granulométrica com descontinuidades, podendo ser corrigida utilizando areia média de rio.

Quanto mais angulosas forem as partículas de agregado miúdo, maior será a resistência ao cisalhamento da argamassa, dificultando a deformabilidade do

concreto. A FIG. 3.1 mostra a relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência do CAA que ela constitui ao cisalhamento (OKAMURA e OUCHI 2003 apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 33).

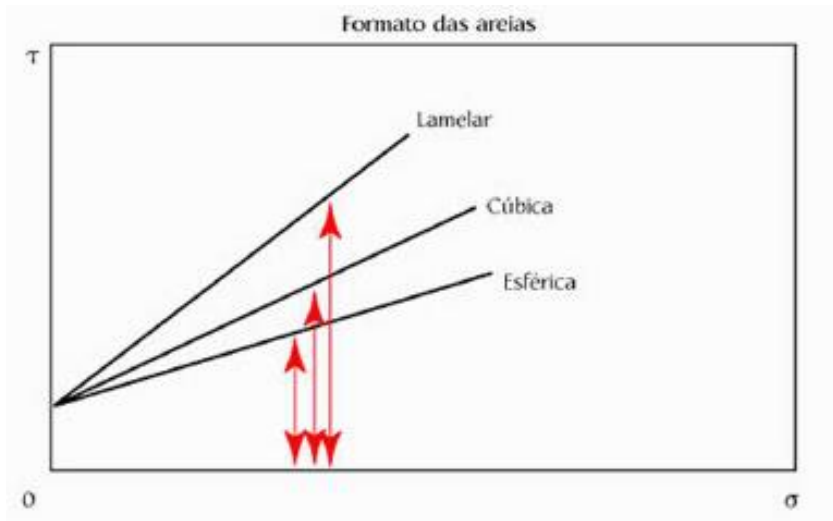


FIG. 3.1 – Relação entre a forma do agregado miúdo e a resistência do CAA ao cisalhamento, onde  $\sigma$  é a tensão normal e  $\tau$  é a tensão cisalhante. (OKAMURA e OUCHI 2003 apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 34)

### 3.4 AGREGADOS GRAÚDOS

Para segurar a passagem do concreto por todos os obstáculos durante o lançamento e diminuir a tendência à segregação, utiliza-se na prática agregados graúdos com tamanhos máximos de 19 mm, sendo comuns os de tamanhos entre 12,5 e 19 mm.

É indicado para o CAA que os agregados tenham coeficiente de forma o mais próximo de um, o possível, pois a forma e textura superficial do agregado são fatores relevantes ao comportamento mecânico. Apesar de agregados angulares com superfícies ásperas possuírem melhor aderência com pasta de cimento que os agregados lisos e arredondados, se a angulosidade for muito aguda, pode ocorrer efeito inverso no aumento do consumo de água e redução da trabalhabilidade (TUTIKIAN, 2008).

O empacotamento dos grãos é afetado pela distribuição granulométrica, que conseqüentemente, pode modificar a fração volumétrica das britas que serão utilizadas na mistura de concreto, a qual está relacionada sobremaneira ao módulo de elasticidade do concreto e a retração por secagem. Os concretos com mais agregados e, portanto, com menor teor de argamassa, são menos deformáveis e com menores chances de retração (TUTIKIAN apud METHA e MONTEIRO, 2008).

### 3.5 ADITIVOS

Uma das diferenças entre o CVV e o CAA são os aditivos, entre os quais existem dois principais: os superplastificantes e os modificadores de viscosidade. O primeiro garante que seja alcançada alta fluidez nas misturas, enquanto o segundo, aumenta a coesão, evitando a exsudação e segregação do concreto.

#### 3.5.1 PLASTIFICANTES E SUPERPLASTIFICANTES

Os superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias, baseado na sua composição química:

a) Lignossulfatos ou lignossulfonatos modificados (LS): incorporam ar e retardam, com diversas intensidades, a pega do cimento;

b) Sais sulfonatos de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas de naftaleno (NS). Estes compostos não incorporam ar e praticamente não interferem no tempo de pega do cimento;

c) Sais sulfonatos de policondensado de melanina e formaldeído, usualmente denominados de melanina sulfonato ou apenas de malamina (MS). A melanina pode apresentar uma tendência a retardar a pega do cimento e, eventualmente, incorporar pequena quantidade de ar;

d) Policarboxilatos (PC): são aditivos superplastificantes de alta eficiência que dispersam e desfloculam as partículas de cimento, sendo, portanto, os mais indicados para serem utilizados em CAA (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).



A FIG. 3.2 mostra as etapas de ação do aditivo superplastificantes a base de polycarboxilatos (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A elevada taxa de perda de consistência com o tempo dos aditivos em relação aos CVV, tem sido um entrave a sua propagação. Dependendo das condições, a consistência dos superplastificantes perdura apenas de 30 a 60 minutos, e a máxima trabalhabilidade atingida se mantém por 10 a 15 minutos. Assim sendo, a incorporação do superplastificante deve ser realizada períodos antes de seu lançamento na obra (TUTIKIAN apud MAILVAGAN,1979).

A adição de superplastificantes resulta em um aumento de trabalhabilidade em todos os tipos de cimento Portland, porém não garante a mesma eficiência para cada um deles. A eficiência do aditivo poderá variar de acordo com vários fatores, como por exemplo, a finura do cimento, a sua composição química e também o consumo de cimento no concreto (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

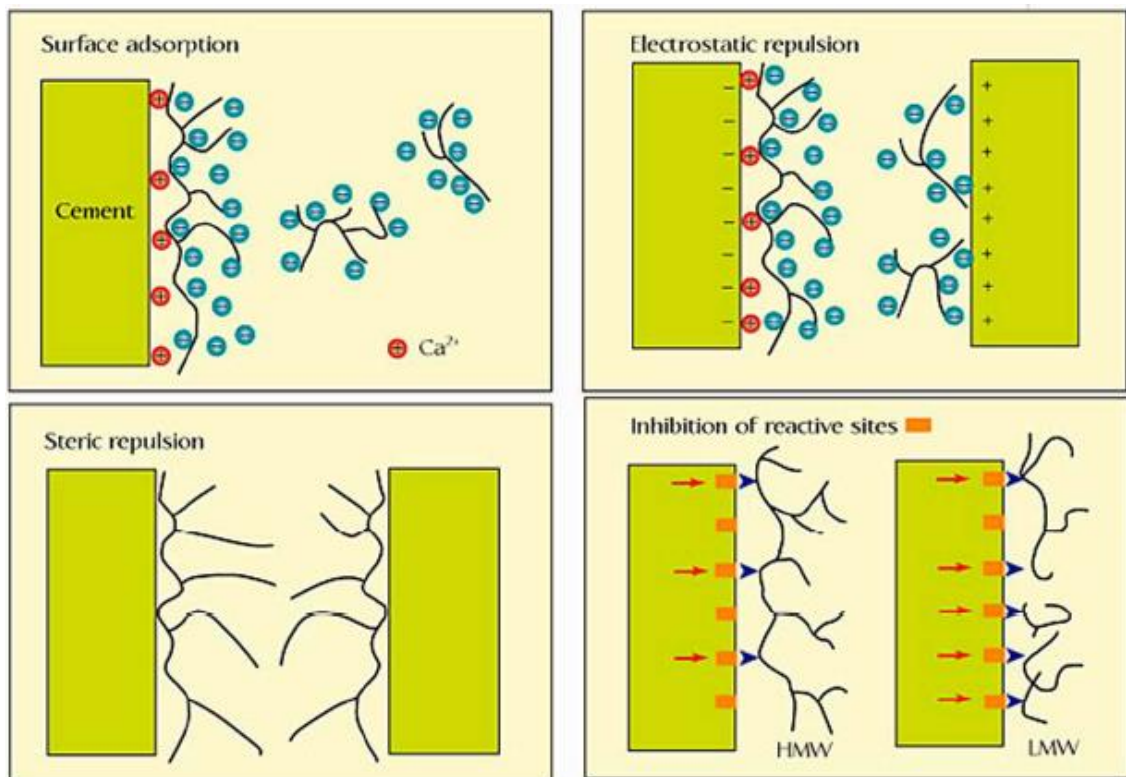


FIG. 3.2 – Etapas de ação do aditivo superplastificantes a base de polycarboxilatos. (TUTIKIAN e DAL MOLIN,2008)

### 3.5.2 MODIFICADORES DE VISCOSIDADE

De acordo com TUTIKIAN e DAL MOLIN (2008) “os aditivos modificadores de viscosidade (VMA) são produtos à base de polissacarídeos com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica.” Ao adicioná-los ao concreto, melhoram a coesão da massa no estado fresco, o que impede a segregação e limita a perda de água por exsudação.

Além disso, o VMA substitui componentes finos do concreto, que fará com que a mistura tenha poucas partículas pequenas, diminuindo a área superficial do material e, portanto, o consumo de água (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

O emprego do VMA é dispensável, porém, ao utilizá-lo em conjunto com os superplastificantes de última geração, permitem obter misturas estáveis e de grande fluidez.

## 3.6 ÁGUA

Expresso usualmente com uma relação água/cimento, por peso ou volume. É o parâmetro mais importante no controle das propriedades do concreto. Pode-se dividir a quantidade de água numa mistura em quatro situações: para hidratação do cimento; para absorção e adsorção dos agregados e materiais finos; preencher a porosidade do esqueleto granular; e para garantir a fluidez do concreto (GOMES, 2009).

A relação água/cimento ( $a/c$ ) influencia sobremaneira as propriedades reológicas do concreto fresco. Dessa forma, um aumento na relação  $a/c$  provoca uma redução na viscosidade plástica e na resistência de fluxo. Porém, uma baixa relação  $a/c$  e a utilização de superplastificantes geram concretos com alta viscosidade (GOMES apud BEAUPRÉ e MINDESS, 1998).

#### 4 NORMATIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO CAA

O concreto auto adensável satisfaz a três propriedades características principais: capacidade de preenchimento, habilidade de passagem por obstáculo e resistência à segregação (GOMES, 2009). Para se atingir essas propriedades, são realizados ensaios previstos na norma ABNT NBR 15823, que são: método do ensaio do Cone de Abrams, método do anel J, método da Caixa L, método do Funil V e método da coluna de segregação.

##### 4.1 MÉTODO DO CONE DE ABRAMS

O método do cone de Abrams serve para a determinação do espalhamento e do tempo de escoamento, estando previsto na ABNT NBR 15823-2 (2017). O cone é confeccionado em chapa metálica de 1,5 mm de espessura, com forma de tronco de cone com 300 mm de altura, 200 mm de diâmetro interno da base inferior, 100 mm de diâmetro interno da base superior.

A FIG. 4.1 apresenta um desenho esquemático do cone de Abrams.

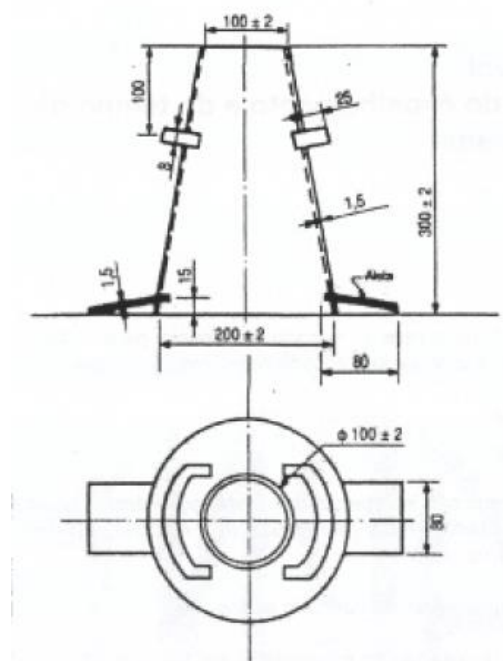


FIG. 4.1 – Desenho esquemático do cone de Abrams. (ABNT NBR 15823-2, 2017).

A FIG 4.2 apresenta uma foto do aparato para se medir o abatimento do tronco de cone Abrams utilizado no laboratório.



FIG. 4.2 – Foto do cone de Abrams.

Para a realização do ensaio em CAA, posiciona-se o cone sobre a marcação circular de 200 mm de diâmetro, conforme FIG 4.3. Preenche-se com o concreto sem adensamento e de forma contínua e uniforme, em tempo não superior a 2 min após sua coleta. Após o preenchimento, o molde é levantado em tempo não superior a 5 s e de forma uniforme, e o concreto flui livremente. O resultado do ensaio é o espalhamento da massa de concreto, obtido por meio da média de dois diâmetros perpendiculares do círculo formado pela pasta de concreto.

No momento da desmoldagem, deve-se iniciar a cronometragem do tempo ao se iniciar o levantamento do molde pelo operador, e parado quando a massa de concreto cobrir totalmente a marca circular de diâmetro 500 mm, intervalo de tempo denominado  $t_{500}$ , em segundos (ABNT NBR 15823-2).

A extensão do diâmetro final do fluxo  $D_{final}$  para CAA deve estar entre 60 cm e 80 cm, e o  $t_{500}$ , entre 2 e 7 segundos (GOMES, 2009).

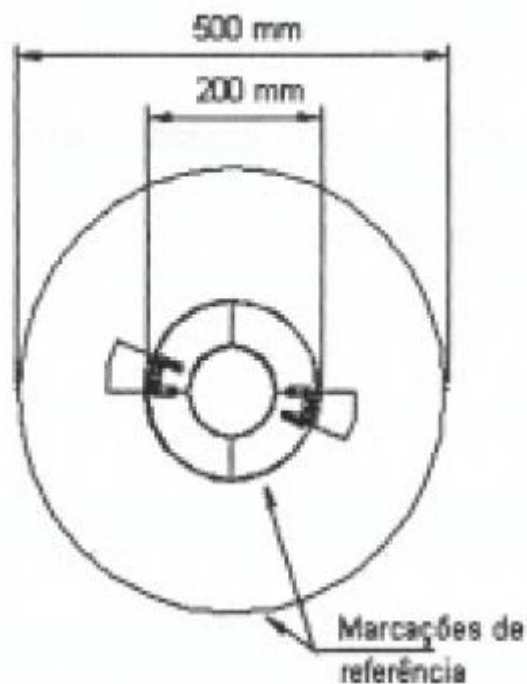


FIG. 4.3 – Vista em planta do posicionamento do molde.

#### 4.2 MÉTODO DO ANEL J – DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE

O ensaio do cone de Abrams não simula as armaduras de uma estrutura real, por isso o teste do anel J é um complemento aplicado àquele ensaio.

O ensaio é realizado utilizando-se um anel com barras de aço espaçadas de acordo com a armadura real que buscam simular. Normalmente é utilizado o diâmetro de 300 mm e uma altura de 100 mm, com um espaçamento entre as barras que deve ser 3 vezes a dimensão máxima característica do agregado graúdo utilizado (TUTIKIAN, 2008).

De acordo com a norma ABNT NBR 15823-3 (2017), o resultado consiste em determinar: o diâmetro final  $d_f$  atingido pela massa do concreto, por meio da média aritmética de duas medidas realizadas em direções perpendiculares; a diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido no ensaio com o cone de Abrams e do ensaio do anel J; e permite a verificação da fluidez e da habilidade passante do concreto por obstáculos.

O valor do ensaio consistirá na diferença de altura entre o concreto imediatamente interior e imediatamente exterior ao anel, não podendo ultrapassar 1,0 cm (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A FIG. 4.4 mostra um desenho esquemático do anel J em conjunto com o cone de Abrams.

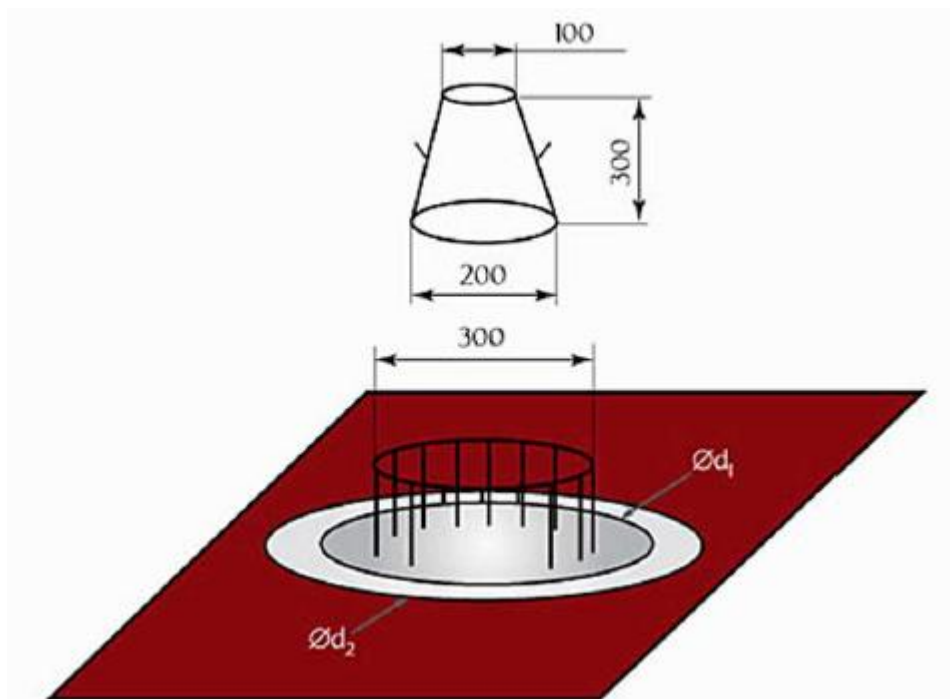


FIG. 4.4 – Anel J em conjunto com o cone de Abrams. (TUTIKIAN apud EFNARC, 2002, p. 52)

#### 4.3 MÉTODO DA CAIXA L – DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE

O ensaio da caixa L mede a fluidez do concreto simultaneamente à sua capacidade de passar por obstáculos e permanecer coeso (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A aparelhagem consiste em uma caixa em forma de “L” que possui um compartimento vertical e um compartimento horizontal separado por uma porta. Juntamente a esta porta, existem armaduras espaçadas, cujo espaçamento depende

do diâmetro máximo característico do agregado graúdo (GOMES, 2009). A figura 4.5 ilustra o aparato para o ensaio pelo método da caixa L.

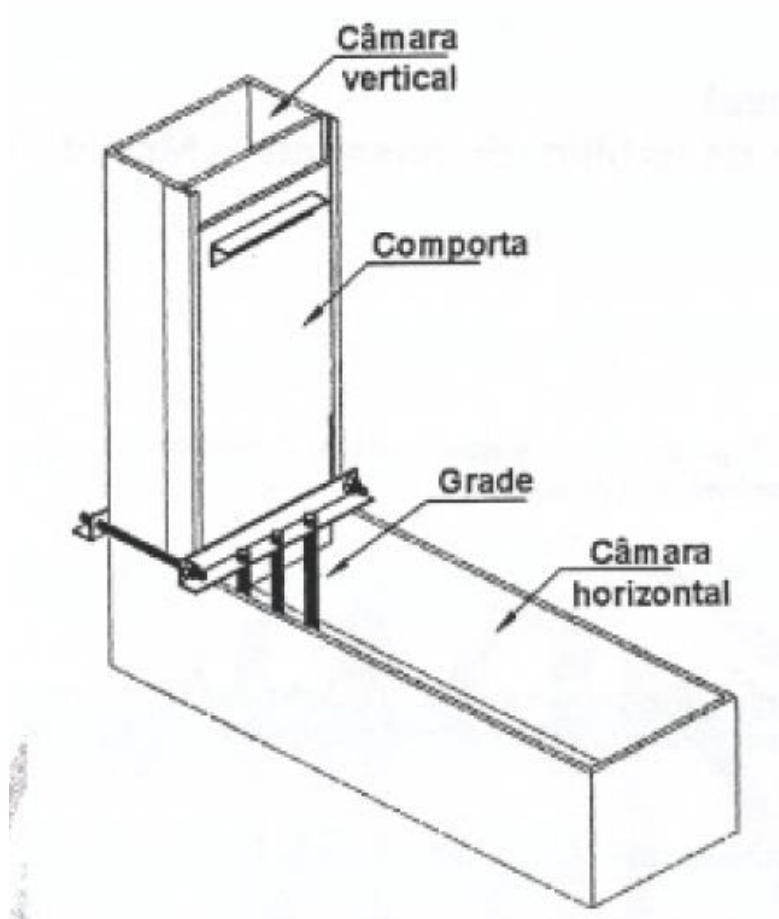


FIG. 4.5 – Ilustração do ensaio da caixa L. (ABNT NBR 15823-4, 2017)

A câmara deve ser limpa com água, depois deve-se fechar a comporta e nivelar a caixa L em uma superfície plana. A câmara vertical deve ser preenchida totalmente de forma uniforme e sem adensamento. A abertura da comporta deve ser efetuada de forma rápida, uniforme, sem interrupção (ABNT NBR 15823-4, 2017).

Cessado o escoamento, são medidas leituras H1 e H2 conforme visto na figura 4.6, e calcula-se a habilidade passante HP por meio da equação:

$$HP = \frac{H1}{H2} \quad (\text{EQ. 4.1})$$

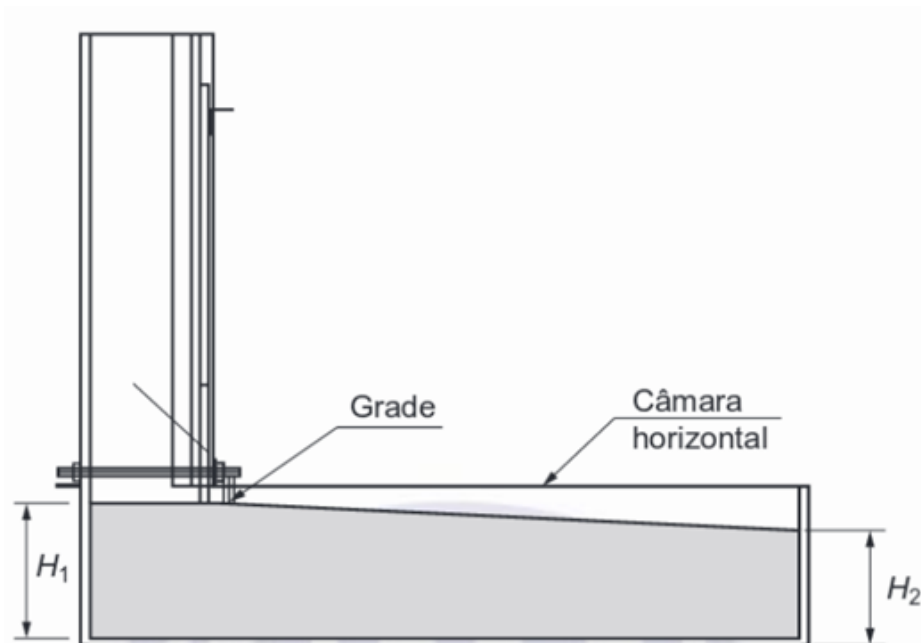


FIG. 4.6 – Indicação das alturas H1 e H2. (ABNT NBR 15823-4, 2017).

Após as medições das alturas, HP deve estar situado entre 0,80 e 1,00. Além disso, deve-se atentar para a o deslocamento do concreto durante o ensaio, pois se o mesmo estiver segregando ao passar nos obstáculos, a argamassa chegará ao final da caixa antes do agregado graúdo (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

#### 4.4 MÉTODO DA CAIXA U – DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE

A caixa de perfil U é de seção retangular, formada por dois compartimentos verticais unidos por um trecho em curva, conforme figura 4.7. A caixa deve ter espessura de 1,5 mm, de preferência em chapa metálica. Na parte inferior deve haver três barras metálicas lisas com diâmetro de  $(12,5 \pm 0,2 \text{ mm})$ , espaçadas entre si de  $(40 \pm 1 \text{ mm})$ .

Para iniciar o ensaio deve-se limpar e umedecer as paredes internas da caixa. Em seguida, preenche-se um dos compartimentos totalmente, de maneira uniforme e sem adensamento. Após 60s do final do preenchimento, abre-se a comporta de maneira ininterrupta e uniforme, a fim de permitir que haja escoamento para o outro compartimento.



Findo o escoamento, mede-se as alturas  $R_1$  e  $R_2$ , e calcula-se a habilidade passante (HP), como sendo a diferença das duas alturas, após o concreto permanecer em repouso, em seu interior, por 1 min (ABNT NBR 15823-4, 2017).

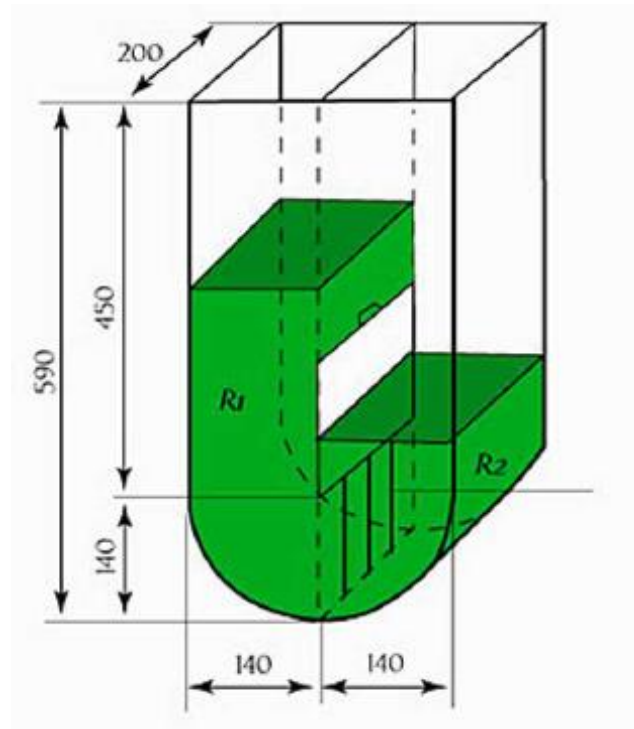


FIG. 4.7 – Coluna de segregação. (EFNARC, 2002 apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 57).

#### 4.5 MÉTODO DO FUNIL V – DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE

O método do funil V mede a fluidez do concreto, tal qual o ensaio do cone de Abrams, para agregados graúdos de dimensão máxima característica de 20 mm.

Tem-se a possibilidade de utilizar dois aparelhos, conforme a FIG. 4.8. Na extremidade inferior existe uma porta, deslizante ou com dobradiça, para que contenha o concreto no interior do aparelho e que possa ser aberta para iniciar o ensaio. O tempo decorrido para o escoamento do material, é a medida desejada. Com a finalidade de testar a resistência à segregação do concreto, após a execução do ensaio, pode-se preencher o funil com concreto e aguardar cinco minutos e

repetir o procedimento. Se o CAA estiver segregando, o tempo de escoamento sofrerá um acréscimo significativo (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

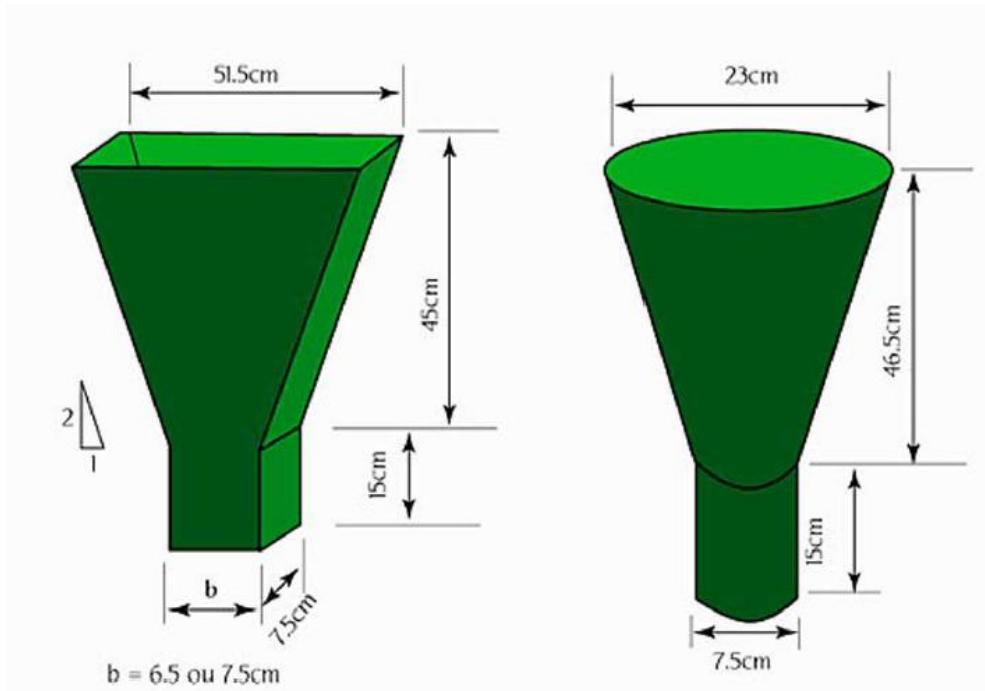


FIG. 4.8 – Aparelhos para o método do funil V. (GOMES, 2002 apud TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008, p. 9)

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO – MÉTODO DA COLUNA DE SEGREGAÇÃO

O ensaio da coluna de segregação é utilizado para determinar a resistência à segregação do concreto auto adensável pela diferença das massas de agregado gráúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação.

A coluna de segregação é constituída por um tubo de PVC de 200 mm de diâmetro e 660 mm de altura, particionado em três partes. A parte superior e inferior possui uma altura de 165 mm, enquanto a parte central, 330 mm. As seções são unidas por grampos, presilhas de fixação ou fita adesiva.

Para execução do ensaio deve-se, primeiramente, executar a limpeza e o umedecimento interno da coluna de segregação. Em seguida, deve-se preencher a mesma com o concreto sem adensamento, de forma ininterrupta e uniforme. Após vinte minutos posteriores a moldagem, retira-se as porções de concreto da base e do topo. Cada porção deve ser lavada sobre uma peneira de 4,75 mm a fim de se remover totalmente a argamassa e limpar o agregado graúdo. Estes devem ser secados superficialmente e terem suas massas medidas, obtendo assim  $m_B$ ,  $m_T$  de cada amostra. (ABNT NBR 15823–6, 2017).

Assim, a resistência à segregação do concreto é obtida pela diferença percentual entre a quantidade de agregado graúdo retida da base e a do topo da coluna de segregação e é calculada segundo a equação:

$$SR = 2 \cdot \frac{(m_B - m_T)}{(m_B + m_T)} \cdot 100 \quad (\text{EQ. 4.2})$$

Onde:

SR é a resistência à segregação do concreto (%);

$m_B$  é a massa do agregado graúdo retida na base da coluna (g); e

$m_T$  é a massa do agregado graúdo retida no topo da coluna (g).

A FIG 4.9 ilustra o aparato usado no ensaio de coluna de segregação.

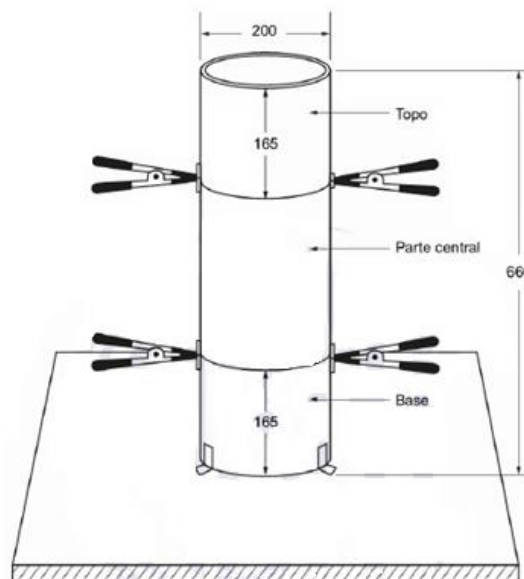


FIG. 4.9 – Coluna de segregação. (ABNT NBR 15823–6, 2017).

#### 4.7 CLASSIFICAÇÃO DO CAA NO ESTADO FRESCO

Utilizar-se-á a norma ABNT NBR 15823-1 (2017) como referência técnica para classificar o CAA de acordo com os resultados obtidos nos ensaios supracitados. A TAB. 4.1 apresenta a classificação de norma:

TAB. 4.1 – Classificação do CAA de acordo com ensaios.(ABNT NBR 15823-1,2017)

<b>Classes de espalhamento (slump-flow)</b>			
<b>Classe</b>	<b>Espalhamento (mm)</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Aplicação</b>
SF 1	550 a 650	ABNT NBR 15823-2	Lajes
SF 2	660 a 750		Paredes, vigas
SF 3	760 a 850		Pilares
<b>Classes de viscosidade plástica aparente ( <math>t_{500}</math> )</b>			
<b>Classe</b>	<b><math>t_{500}</math></b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Aplicação</b>
VS 1	$\leq 2$	ABNT NBR 15823-2	Lajes
VS 2	$> 2$		Vigas, pilares
<b>Classes de índice de estabilidade visual (sob fluxo livre)</b>			
<b>Classe</b>	<b>IEV</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>-</b>
IEV 0 (Altamente estável)	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2	-
IEV 1 (Estável)	Sem evidência de segregação e leve exsudação		-
IEV 2 (Instável)	Presença de pequena auréola de argamassa ( $\leq 10\text{mm}$ ) e /ou empilhamento de agregados no centro do concreto		-
IEV 3 (Altamente instável)	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassas nas extremidades (auréola de argamassa $> 10\text{mm}$ )		-

<b>Classes de habilidade passante pelo anel J (fluxo livre)</b>			<b>Aplicação</b>
<b>Classe</b>	<b>Anel J (mm)</b>	<b>Método de ensaio</b>	
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	ABNT NBR 15823-3	Lajes, painéis
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço		Vigas, pilares
<b>Classes de habilidades passantes pela Caixa L (sob fluxo confinado)</b>			
<b>Classe</b>	<b>Caixa L (H2/H1)</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Aplicação</b>
PL 1	≥ 0,8, com duas barras de aço	ABNT NBR 15823-4	Lajes, painéis
PL 2	≥ 0,8, com três barras de aço		Vigas, Pilares
<b>Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado)</b>			
<b>Classe</b>	<b>Funil V (s)</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Aplicação</b>
VF 1	< 9	ABNT NBR 15823-5	Lajes
VF 2	9 a 25		Vigas, pilares
<b>Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação</b>			
<b>Classe</b>	<b>Coluna de segregação (%)</b>	<b>Método de ensaio</b>	<b>Aplicação</b>
SR 1	≤ 20	ABNT NBR 15823-6	Lajes (finas)
SR 2	≤ 15		Pilares, paredes

#### 4.8 CAA NO ESTADO ENDURECIDO

O CAA, tanto quanto o CCV e qualquer mistura que contenha cimento Portland em sua constituição, apresentará fissuração de secagem e alto calor de hidratação, se dosado com alto teor de cimento. Além disso, se o teor de superplastificante estiver em excesso, a pega inicial será retardada, resultando em um módulo de elasticidade baixo e uma alta probabilidade de retração plástica se for dosado com baixo consumo de agregado graúdo (TUTIKIAN de DAL MOLIN, 2008).

O adensamento ou compactação é um fator envolvido no processo de concretagem que pode comprometer o CCV, diferentemente do CAA. A exsudação e

o adensamento incompleto são causadores de vazios do concreto, os quais, variam de 1 a 10% de seu volume, sendo que as misturas que atingem esse último valor, apresentam muitas falhas e resistências muito baixas (TUTIKIAN apud NEVILLE, 1982).

O lançamento do CAA requer muito menos habilidade ou mão-de-obra para se conseguir um produto uniforme e denso. Em consequência do lançamento do CAA possuir maior qualidade, suas propriedades no estado endurecido são iguais ou melhores que as dos CCV correspondentes. Assim, pode-se afirmar que o adensamento e a consequente durabilidade do concreto são mais seguros utilizando-se o CAA (TUTIKIAN e DAL MOLIN, 2008).

A resistência do CAA em relação ao CCV no que tange ao fator água cimento, possui semelhante evolução ao longo do tempo para uma mesma faixa de resistência, assim como resistência à tração. Porém, ao se utilizar elevados teores de argamassa para produzir o CAA, existe a tendência de aumentar a retração química e retração por secagem, assim como a retração térmica também aumenta para elevados consumos de cimento e adições quimicamente ativas (TUTIKIAN apud MEHTA E MONTEIRO, 2006).

A partir da figura 4.10 pode-se perceber que o aumento do teor de argamassa fez o módulo de elasticidade do CAA variar entre 54 e 75%, confirmando a redução da propriedade após teores de 65%. Comparando o CAA e o CCV com teor de argamassa na faixa de 54%, o primeiro obteve resultados pouco melhores, devido ao seu melhor adensamento e empacotamento relativo à existência dos finos. Em relação a outras propriedades mecânicas e de durabilidade, constatou-se que não há razões para preocupação com a utilização do CAA. Dessa forma, pode-se verificar que o CAA é semelhante ao CCV no estado endurecido, com suas propriedades variando conforme sua dosagem, e por isso, altos teores de argamassa e de superplastificantes devem ser evitados (TUTIKIAN, 2008).

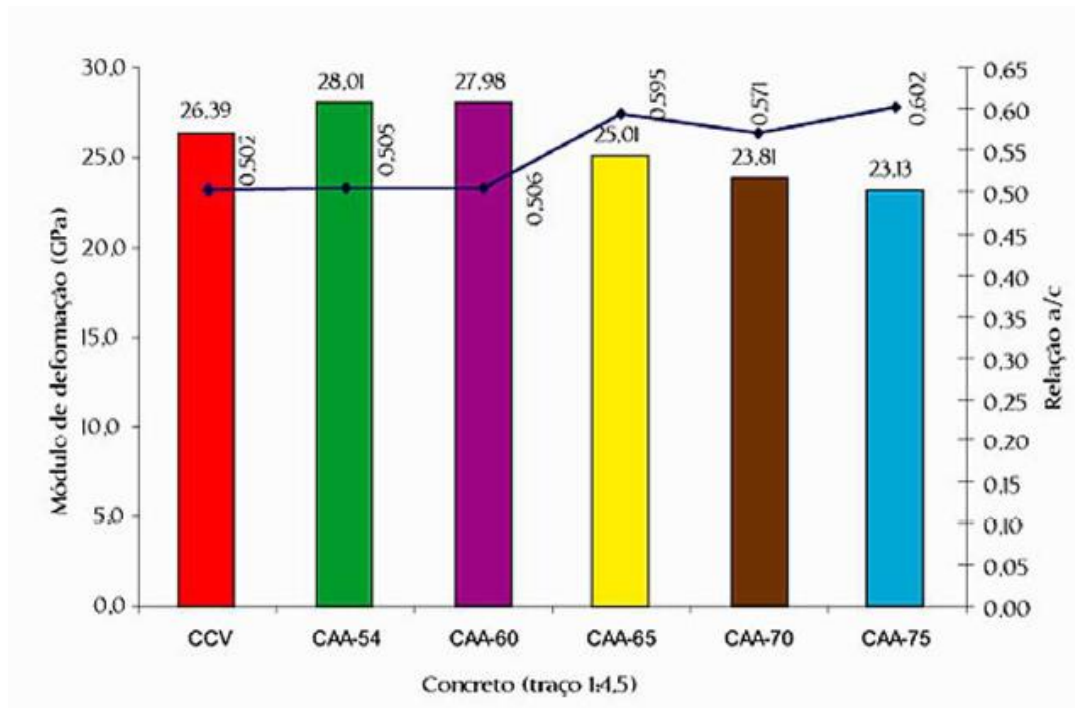


FIG. 4.10 – Módulo de elasticidade de CAA e CVV em função do teor de argamassa.  
 Fonte: (TUTIKIAN apud MANUEL, 2005).

## 5 FADIGA

Fadiga é um fenômeno associado a ações dinâmicas repetidas, que pode ser entendido como um processo de modificações progressivas e permanentes da estrutura interna de um material submetido a oscilação de tensões decorrente dessas ações (ABNT NBR 6118, 2017).

A resistência à fadiga poder ser entendida como a capacidade de um material resistir a carregamentos cíclicos com redução de uma fração da resistência estática por um certo número de ciclos. (SARAIVA, 2017)

### 5.1 COMPORTAMENTO À FADIGA DO CONCRETO

A fadiga é decorrente de um processo de degradação progressiva na microestrutura cristalina do material sujeito a deformações ou a tensões impostas com magnitudes inferiores à deformação ou à tensão de ruptura.

A fissura por fadiga nos concretos de cimento Portland é de natureza frágil, e dessa forma há pouca ou nenhuma deformação plástica associada à fissuração. O processo ocorre pela iniciação e propagação de microfissuras, e de modo geral a direção da tensão aplicada é perpendicular à direção da superfície da fratura. (CERVO apud CALLISTER, 2004).

Segundo o American Concrete Institute (ACI), a ruptura por fadiga é ocasionada por uma microfissuração interna gradual, a qual leva ao aumento das deformações do material. E de acordo com o Comité Euro Internacional dú Béton (CEB) , as fissurações não possuem uma topografia superficial definida, o que torna difícil identificar as fadigas nas estruturas de concreto.

O processo de ruptura por fadiga é identificado por três etapas nas quais acarretam o enfraquecimento gradual da estrutura.

Na primeira etapa tem-se a iniciação da fissura, ao se formar uma pequena fissura em algum ponto de alta concentração de tensões, ou a existência de microfissuras pré-existentes devido à presença de falhas no concreto, ou ainda, ambas situações.



Na etapa posterior, há a propagação da fissura em que a mesma progride em incrementos a cada ciclo de tensões, ocasionada pela presença de zonas de concentrações de tensões.

A terceira etapa é a ruptura final, a qual ocorre célere, visto que a fissura atinge sua abertura crítica (CERVO, 2004).

A ruptura por fadiga ocorre quando a carga aplicada proporciona tensão suficiente para que haja crescimento e propagação de fissuras ou transformações significativas no material, alcançando um estado de instabilidade e abalando a vida útil da estrutura. Tal situação é conhecida como o limite de fadiga do material (CERVO, 2004).

As propriedades da fadiga podem ser determinadas a partir de ensaios de simulação em laboratório, e como resultado tem-se dados apresentados graficamente na forma de uma tensão ( $\sigma$ ) ou de uma deformação ( $\epsilon$ ) em função do número de ciclos (N) até a ruptura de cada corpo de prova ensaiado (CERVO, 2004).

Um parâmetro importante que determina o desempenho à fadiga de um elemento estrutural é a quantidade de ciclos (N) que um material é capaz de suportar ao ser submetido a um nível específico de tensão. Nos ensaios de fadiga, constata-se que quanto maior a magnitude da tensão, menor será o número de ciclos que o material é capaz de resistir antes da ruptura. Porém, existe um valor mínimo da razão entre a tensão aplicada e a resistência à tração na flexão estática abaixo do qual não ocorrerá ruptura por fadiga (SARAIVA, 2017).

Para um nível de variação de tensão, obtém-se diversos valores de N, dessa forma, os resultados obtidos devem ser analisados estatisticamente, a fim de obter números de ciclos confiáveis para a caracterização dos materiais à fadiga. A dispersão nos resultados é explicada pela existência de muitas variáveis associadas ao problema de fadiga, tais como condições de moldagem dos corpos de prova, alinhamento dos corpos de provas no equipamento de teste, tensão média de ruptura, frequência aplicada, defeitos pré-existentes no material, entre outros (SARAIVA, 2017).

## 5.2 RELAÇÃO DE TENSÃO

A parcela da resistência estática que pode ser suportada para um determinado número de ciclos é definida como resistência à fadiga, podendo ser representada em diagrama que indica o número de ciclos, ou o logaritmo desse número, em função da relação de tensão, RT, dada por:

$$RT = \frac{\sigma}{\sigma_{rup}} \quad (\text{EQ. 5.1})$$

onde  $\sigma$  é a tensão solicitante e  $\sigma_{rup}$  é a tensão de ruptura do material no ensaio estático.

## 5.3 FREQUÊNCIA DE CARREGAMENTO

Quando um pavimento está submetido a cargas repetidas, cada ciclo pode iniciar ou propagar microfissuras no concreto, sob condição de que o nível de carga ultrapasse um nível mínimo, até que seu aumento possa causar ruptura do material (CERVO, 2004).

Quanto maior o nível de tensão aplicada, menor será o número de ciclos alcançado, e de maneira mais rápida o concreto se danificará por fadiga, para uma mesma frequência de carregamento. Caso um nível relativamente alto de tensão seja aplicado, será preciso um menor número de cargas repetidas para que ocorra o colapso da estrutura. A redução da frequência de aplicação de carga também acelera a ruptura (CERVO apud STET E FRÉNEY, 1998).

De acordo com as literaturas existentes chega-se à conclusão de que a combinação entre a frequência de carregamento e o nível de tensão aplicada refletem no desempenho do material à fadiga, e devem ser admitidas em um mesmo modelo de fadiga (SARAIVA, 2017).

De acordo com a norma ABNT NBR 6118 (2014), a frequência crítica para vibrações verticais varia de 3,5 a 8 Hz. Na falta de valores determinados

experimentalmente, a referida norma sugere a adoção dos valores apresentados na TAB 5.1.

TAB. 5.1 – Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas.

<b>Caso</b>	<b><math>f_{crit}</math>(Hz)</b>
Ginásio de esportes e academia de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concreto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

#### 5.4 MODELOS DE FADIGA NA FLEXÃO

Normalmente, muitos modelos são apresentados em função do número de ciclos de carregamento e da relação entre o nível de tensão atuante no elemento estrutural e a resistência à tração na flexão estática do concreto, que, quando os dados da curva RT-N se aproximam de uma reta na escala log-linear, podem ser representados pela EQ. 5.2:

$$RT = A - B \cdot \log N \quad (\text{EQ. 5.2})$$

Onde N é o número de repetições de cargas à fadiga, RT é a relação entre a tensão máxima aplicada e a resistência à tração na flexão estática e A e B são constantes empíricas.

Porém, quando os dados da curva RT-N se aproximam de uma reta na escala log-log, a equação fica conforme a EQ. 5.3:

$$RT = C \cdot N^D \quad (\text{EQ. 5.3})$$

Onde C e D são constantes empíricas.

O modelo de ruptura por fadiga mais utilizado no Brasil foi proposto pela *Portland Cement Association* em 1984 (PCA, 1984), publicado no Brasil pela Associação Brasileira de Cimento Portland no Estudo Técnico ET-97 (1996). O método PCA (1984) é destinado a pavimentos de concreto simples e com barras de transferência e aqueles que possuem armadura distribuída, descontínua ou contínua (ET-97, 1996), não abrangendo pavimentos de concreto com fibras.

Inicialmente proposto em 1966, sendo revisto em 1984, com alteração de 0,50 para 0,45 na relação de tensões abaixo da qual o número admissível de ciclos é ilimitado (SARAIVA, 2017), a curva de fadiga é determinada pelas equações EQ. 5.4 e EQ. 5.5:

$$\log N = \frac{0,9718-RT}{0,0828}, \text{ para } RT > 0,55 \quad (\text{EQ. 5.4})$$

$$N = \left( \frac{4,2577}{RT-0,4325} \right)^{3,268}, \text{ para } 0,45 \leq RT \leq 0,55 \quad (\text{EQ. 5.5})$$

Segundo o PCA (1984), a sequência para análise de fadiga é:

a) determinar a tensão equivalente, em função da presença ou não de acostamento de concreto, do tipo de eixo solicitante, do coeficiente de recalque do projeto e da espessura inicialmente proposta;

b) calcular o fator de fadiga para cada tipo de eixo, que é a relação entre a tensão equivalente e a resistência característica à tração na flexão;

c) determinar o número admissível de repetições, em função do fator de fadiga e dos valores das cargas por eixo multiplicados pelo fator de segurança de carga, por meio do ábaco da FIG. 5.1;

d) o consumo de fadiga é o resultado da divisão do número de repetições previstas pelo número admissível de repetições, expresso em porcentagem;

e) o consumo total de fadiga produzido pelo tráfego, considerada a espessura inicialmente proposta, é a soma dos consumos de fadiga individuais.

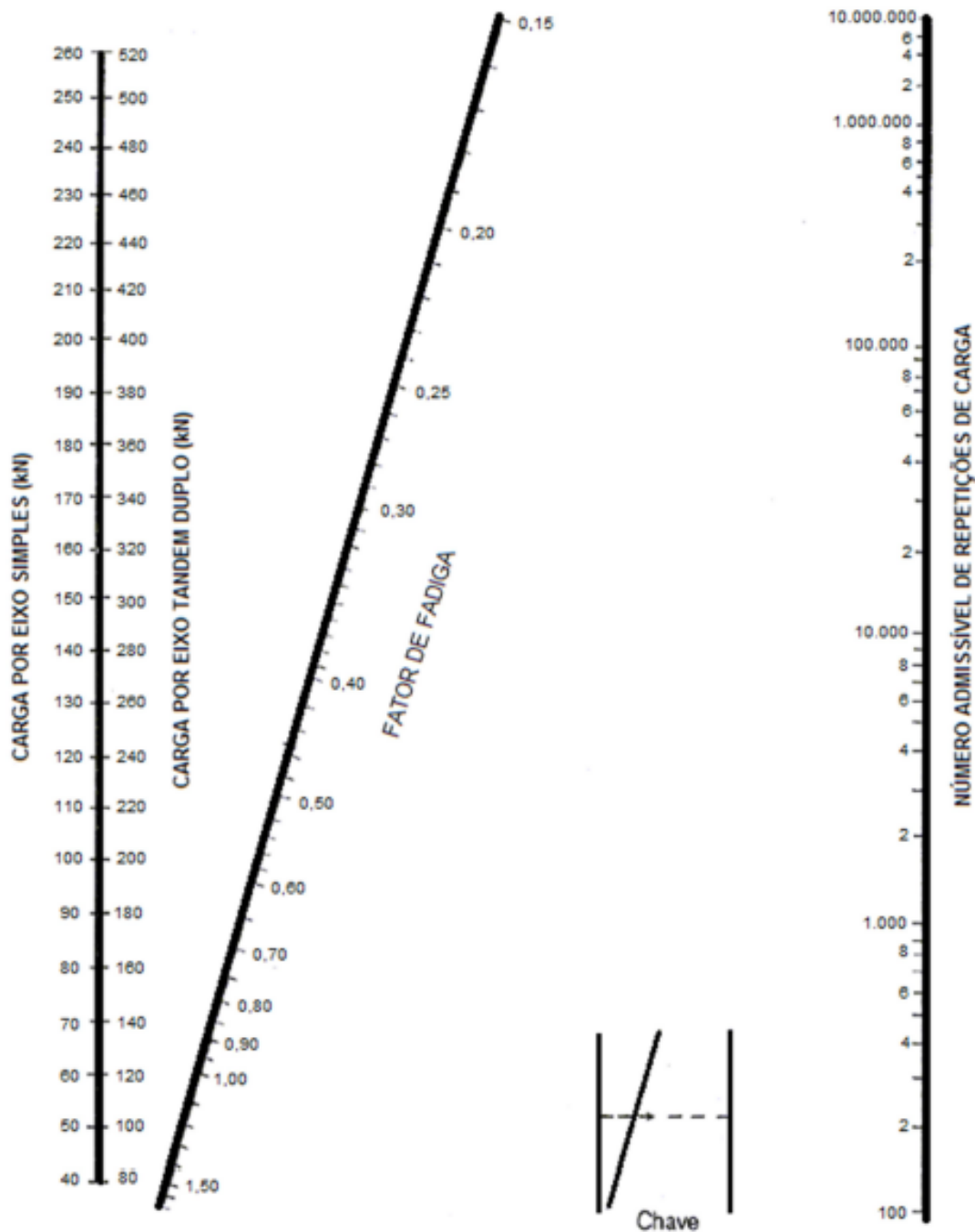


FIG. 5.1 – Análise de fadiga: número admissível de repetições de carga em função do fator de fadiga (com e sem acostamento de concreto) (ET/97, 1996).

## 5.5 CONCRETO COM FIBRAS

Apesar do concreto ser o material de construção mais utilizado do mundo devido a sua boa resistência à compressão e ao fogo, ele possui certas limitações, como a

fragilidade e sua baixa deformação antes da ruptura. A baixa resistência do concreto à tração, pode ser resolvida com a utilização adequada de armadura de aço, porém não é o único modo de aumentar a resistência dele à tração, podendo, assim, ser utilizado a adição de fibras. As fibras são distribuídas aleatoriamente na composição do concreto, assim, costurando-o e diminuindo a abertura e propagação de fissuras.

Na FIG. 5.2 estão representadas as linhas de tensão atuando no concreto fissurado, enquanto no concreto sem fibras a fissura representa uma barreira à propagação de tensões, o concreto com fibras as utiliza como uma ponte de transferência entre tensões, diminuindo a abertura da fissura e sua propagação (MEDEIROS, 2012). As fibras podem ser produzidas a partir de diferentes materiais, como aço, vidro, nylon, polipropileno, poliolefina, entre outros. Sabe-se que o comprimento da fibra deve ser pelo menos duas vezes a dimensão máxima do agregado, sendo usual de 2,5 a três vezes essa grandeza para que ela possa atuar como ponte de transferência de tensões. (SARAIVA, 2017).

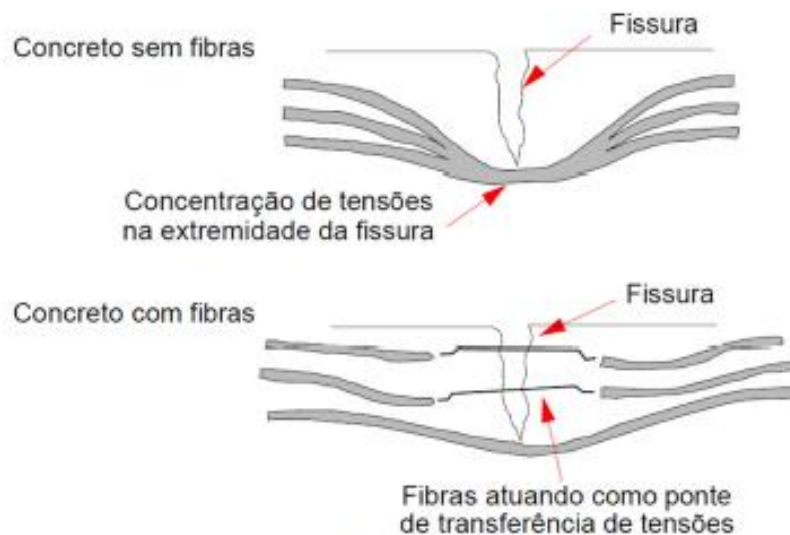


FIG. 5.2 – Mecanismos de transferência de tensões entre a matriz e as fibras (SARAIVA,2017).

## 5.6 ESTUDO DO CAA E SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Serão apresentados nesse tópico, resumos de trabalhos que estudaram o uso de fibras de aço no CAA, bem como o estudo de suas propriedades mecânicas.

### 5.6.1 MEDEIROS (2012)

O objetivo desta pesquisa foi estudar o comportamento à fadiga a compressão de diferentes concretos (sem fibras e com fibras de polipropileno e aço), com destaque na influência da frequência de carregamento. O autor moldou corpos de prova de concreto de alta resistência com a mesma dosagem de concreto, e divididos em três tipos (C1, C2 e C3). No primeiro, foi utilizado concreto sem fibras; no tipo C2, concreto com fibras de polipropileno, e no tipo C3 o concreto com fibras de aço.

Os ensaios de fadiga se iniciaram com frequência de carregamento de 4Hz, seguido de 1Hz, 0,25Hz e por fim 0,0625 Hz. As fibras de polipropileno eram do tipo corrugada com ganchos suaves nas extremidades, com 40mm de comprimento, seção retangular de 0,50 mm x 1,30 mm e esbeltez 62. As fibras de aço tinham ganchos nas extremidades, com 35 mm de comprimento e seção circular com diâmetro de 0,55 mm, com esbeltez 64.

Foram utilizados corpo de provas cúbicos de  $100 \pm 1$  mm de aresta, para ensaios de fadiga de aresta. Não foram escolhidos cilindros padrão de 100 mm de diâmetro, já que estes teriam carga de ruptura inferior aos cubos de 100 mm de aresta. Assim, foi realizado ensaio para obtenção da resistência à compressão em corpos de prova cúbicos  $f_{c_{cub}}$  e para fadiga.

O controle de carga dos ensaios de fadiga foi efetuado utilizando-se um sinal senoidal como mostra a FIG. 5.3.

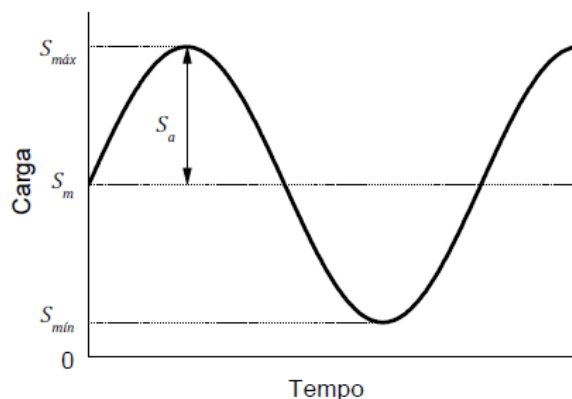


FIG. 5.3 – Sinal senoidal: parâmetros de configuração do ensaio de fadiga MEDEIROS (2012)

Onde  $S_{m\acute{a}x}$  e  $S_{m\acute{i}n}$  s\~{a}o as tens\~{o}es m\~{a}xima e m\~{i}nima,  $S_m$  a tens\~{a}o m\~{e}dia e  $S_a$  a amplitude de carregamento. Al\~{e}m disso, todos os ensaios de fadiga possu\~{i}am as mesmas padroniza\~{c}o\~{e}s quanto \~{a}  $S_{m\acute{a}x} = 85\%$  da resist\~{e}ncia \~{a} compress\~{a}o m\~{e}dia dos corpos de prova c\~{u}bicos  $f_{cub}$  e raz\~{a}o entre tens\~{o}es m\~{i}nima e m\~{a}xima  $R = \frac{S_{m\acute{a}x}}{S_{m\acute{i}n}} = 0,3$ .

Como resultado para os ensaios de fadiga do concreto sem fibras tem-se o gr\~{a}fico da FIG. 5.4, o qual apresenta a frequ\~{e}ncia pelo n\~{u}mero de ciclos, em escala logar\~{i}tmica, verificando-se que o n\~{u}mero de ciclos at\~{e} a ruptura diminui para menores frequ\~{e}ncias. Foi utilizada frequ\~{e}ncia de 4 Hz.

Para os ensaios de fadiga do concreto com fibras de polipropileno, observou-se uma melhora no comportamento \~{a} fadiga em compress\~{a}o deste concreto em rela\~{c}ao ao concreto sem fibras para as menores frequ\~{e}ncias, por exemplo, confrontando-se a quantidade de corpos de prova que suportaram mais de mil ciclos para 0,0625 Hz, 0,25 Hz e 1 Hz. Mesmo assim, alguns corpos de prova n\~{a}o suportaram mais do que cem ciclos para as menores frequ\~{e}ncias. A FIG. 5.5 ilustra os resultados.

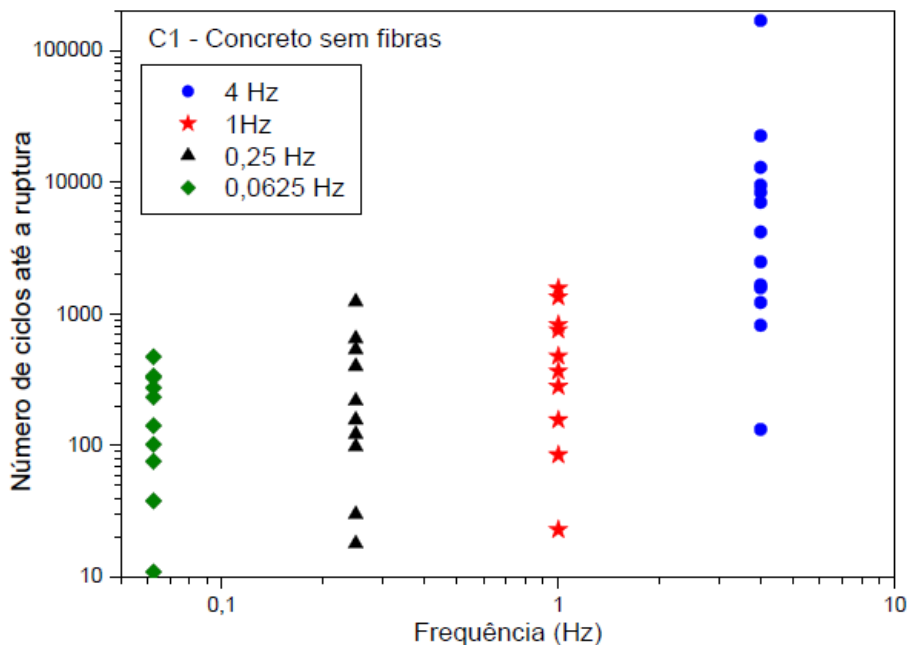


FIG. 5.4 – Ensaio de fadiga: frequ\~{e}ncia x n\~{u}mero de ciclos: concreto sem fibras C1 (MEDEIROS, 2012).



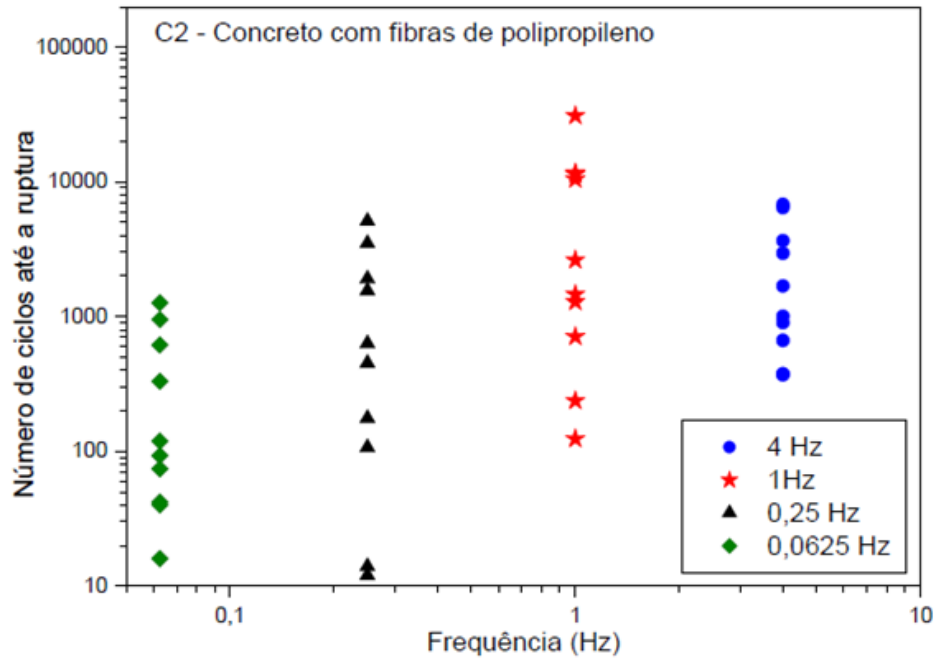


FIG. 5.5 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de polipropileno C2 (MEDEIROS, 2012).

E por fim, tem-se os resultados para o concreto com fibras de aço conforme a FIG. 5.6. Observa-se que o número de ciclos até a ruptura para as menores frequências se aproxima dos números de ciclos para as frequências mais altas, diferentemente do que ocorre no concreto sem fibras, e com melhor desempenho em relação ao concreto com fibras de polipropileno nas menores frequências.

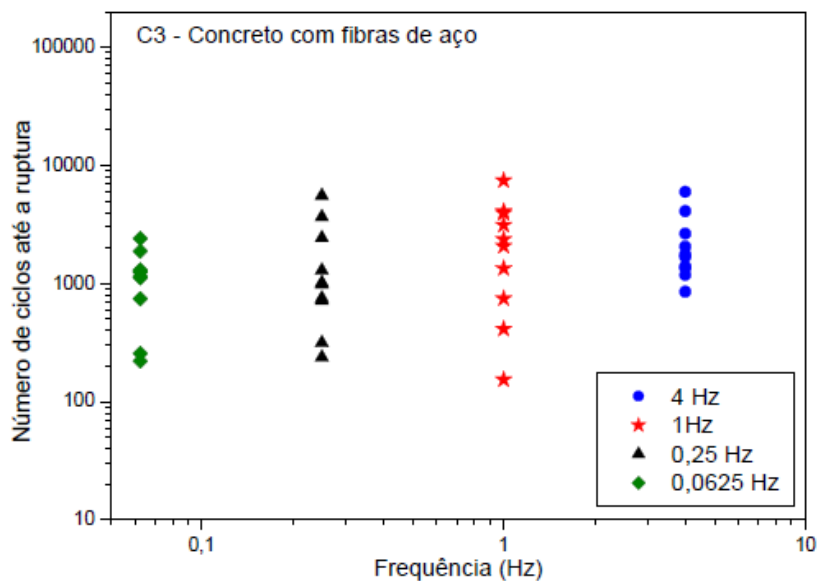


FIG. 5.6 – Ensaio de fadiga: frequência x número de ciclos: concreto com fibras de aço C3 (MEDEIROS, 2012).

Como resultado final, tem-se um gráfico visualizado na FIG. 5.7, na qual é possível comparar os três concretos estudados, para as quatro frequências descritas anteriormente.

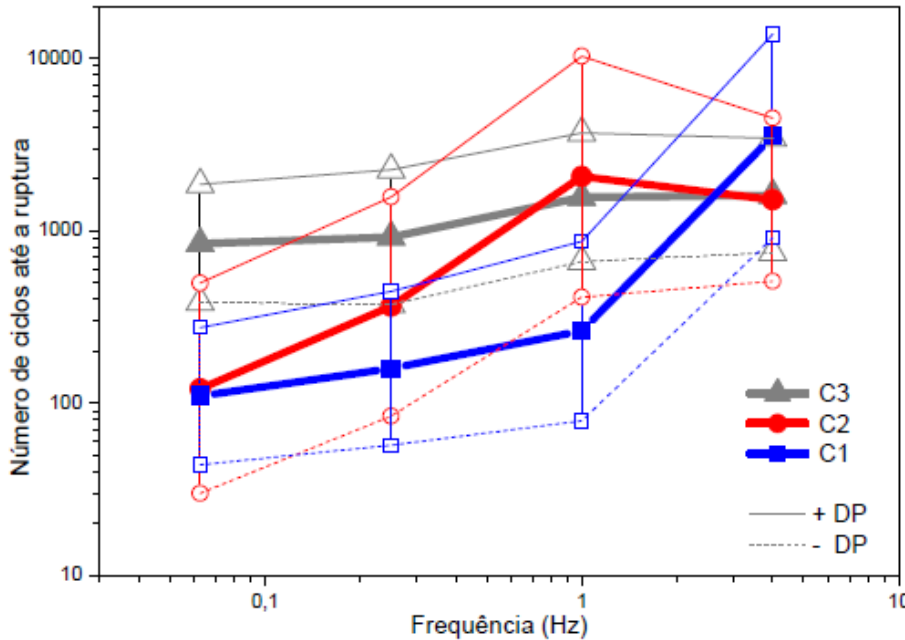


FIG. 5.7 –. Ensaios de fadiga: comparação entre os concretos com e sem fibras (MEDEIROS, 2012).

Observa-se que o comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras de aço foi superior apenas para as menores frequências. O concreto com fibras de polipropileno obteve performance intermediária entre o concreto C1 e o concreto C3. Para a maior frequência testada não houve diferença significativa entre os três concretos. Além disso, comprovou-se através dos ensaios que a frequência de carregamento influencia o comportamento do concreto à fadiga em compressão, e a adição de fibras melhora o desempenho à fadiga para frequências mais baixas.

### 5.6.2 SHIMOSAKA (2016)

Com o intuito de avaliar uma possível melhora no desempenho de um concreto auto adensável sem reforço, para um CAA com fibras (de diferentes tipos), com

diferentes porcentagens em volume, foram feitas várias amostras com essas características citadas para se ter um estudo do comportamento do concreto sujeito a ensaios convencionais. Verificando os resultados obtidos para o estado fresco, nota-se que o concreto perde a fluidez com o aumento do teor de fibras, o mesmo acontece com a propriedade passante do concreto, ou seja, ela diminui conforme aumento do teor de fibras.

Já no estado endurecido, o CAA apresentou significativa melhora de desempenho no que tange sua resistência, porém o tipo de fibra mostrou-se irrelevante para o incremento de resistência, ou seja, ela não influi significativamente. Por exemplo, o 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, sem fibras) 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).

### 5.6.3 CAMARGO (2016)

O autor realizou uma análise do comportamento do CAA nos estados fresco e endurecido alterando os teores de fibras nas amostras: 25, 50 e 75 kg/m<sup>3</sup>, mantendo-se constante a relação água/cimento e o teor de argamassa. Para isso foram utilizados corpos de prova cilíndricos 10 cm x 20 cm e prismáticos 10 cm x 10 cm x 40 cm. Depois do concreto pronto, foram adicionadas as fibras e misturou-se por mais 1 minuto.

Os resultados no estado fresco podem ser resumidos na TAB. 5.2, que mostra os resultados dos Ensaio de espalhamento (Método Cone de Abrams), habilidade passante (Método da Caixa "L") e de viscosidade (Método funil "V").

TAB.5.2 – Resultados do concreto no estado fresco.

	<b>T1 (25 kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T2 (50 kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>T3 (75 kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Espalhamento</b>	75,5 cm	68 cm	60,5 cm
<b>Habilidade Passante</b>	0,90	0,88	0,83
<b>Viscosidade</b>	3s	3s	3s

No espalhamento nota-se que com aumento do teor de fibras, ele perde um pouco da fluidez, diminuindo o diâmetro no ensaio de espalhamento. A habilidade passante também é influenciada com o aumento do teor de fibras, já a viscosidade não teve alteração significativa no seu valor.

Como conclusão observou-se que os valores da resistência à compressão dos concretos com fibras apresentaram, em média, 50 MPa. Quanto a resistência à tração, constatou-se que as resistências apresentaram valores superiores a 4,0 MPa. Por fim, verificou-se que não houve interferência direta das fibras de aço nas resistências à compressão e à tração dos concretos. Os resultados podem ser visualizados na TAB. 5.3, com os teores de fibras de 25,51 kg/m<sup>3</sup> para T1; 45,68 kg/m<sup>3</sup> para T2; e 64,17 kg/m<sup>3</sup> para T3.

TAB.5.3 – Resultados do concreto no estado endurecido.

<b>Traço</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>	<b>Resistência à Tração (MPa)</b>
<b>T1 médio</b>	52,73	4,63
<b>T2 médio</b>	48,65	4,76
<b>T3 médio</b>	47,28	4,45

## 6 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados na confecção dos corpos de prova de concreto, assim como a montagem e execução dos ensaios.

Pretendeu-se investigar o comportamento à fadiga na flexão do concreto simples e com fibras de aço, de forma a verificar o desempenho do CAA em relação ao uso de fibras em sua composição.

Os parâmetros utilizados nesse programa experimental foram: teor volumétrico de fibras ( $V_f = 0,50\%$ ), a relação de tensão ( $RT = 0,70$  e  $0,80$ ) e a frequência de carregamento ( $f = 5$  Hz). A relação entre a tensão mínima aplicada e resistência à flexão estática foi de  $0,10$  em todos os ensaios.

A norma brasileira ABNT NBR 6118 (2018) direciona a utilização de faixa de frequência entre  $3,5$  Hz e  $8,0$  Hz para estruturas e em pavimentos de concreto a frequência de carga pode ser inferior. Dessa forma, escolheu-se por utilizar neste trabalho a frequência de  $5,0$  Hz.

Foram moldados 24 corpos prismáticos de  $100$  mm x  $100$  mm x  $400$  mm de dimensões, dos quais 12 sem fibras e 12 com fibras de aço, a fim de avaliar suas resistências à flexão, estática e à fadiga.

Foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos de  $100$  mm x  $200$  mm de dimensões, dos quais 12 sem fibras e 12 com fibras de aço, com a finalidade de se avaliar as propriedades mecânicas destes concretos em relação à resistência à compressão, módulo de elasticidade longitudinal e resistência à compressão diametral.

### 6.1 MATERIAIS EMPREGADOS

#### 6.1.1 CONCRETO

O traço, em massa, utilizado foi  $1: 2: 2,03: 0,49$  (cimento: areia: agregado graúdo: relação água-aglomerantes), tendo em vista obter uma resistência

característica do concreto cerca de 35 MPa aos 28 dias de idade, sendo o consumo de cimento de 392 kg/m<sup>3</sup> de concreto.

Foi utilizado cimento CPV-ARI, areia natural de rio lavada e agregado graúdo britado do tipo gnaisse com dimensões máximas características de 9,5 mm (brita 0). A quantidade de material empregado por m<sup>3</sup> de concreto pode ser visualizada na TAB. 6.1.

TAB. 6.1 - Quantidade de material empregado por m<sup>3</sup> de concreto

<b>Material</b>	<b>kg</b>
Água	3,24
Cimento	7,22
Areia	14,43
Brita 0	14,65
Fíler calcário	3,61
Superplastificante	0,20
Sílica	0,72

Após 24 horas, os espécimes de concreto foram desformados e imersos em tanque com água saturada de cal por sete dias, sendo então mantidos sob as condições ambientes do Laboratório de Materiais de Construção e Concretos do IME até a data de execução.

### 6.1.2 FIBRA DE AÇO

A fibra de aço utilizada possui seção transversal circular e ganchos de ancoragem nas suas extremidades, sendo um produto comercial WIRAND® FF1, fabricada pela empresa Maccaferri, conforme pode ser visto na FIG. 6.1. Suas principais características estão resumidas na TAB. 6.2.

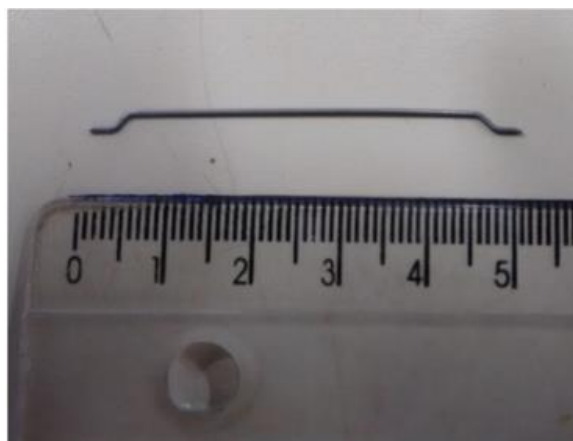


FIG. 6.1 – Geometria da fibra de aço WIRAND® FF1

TAB. 6.2 – Principais características da fibra de aço (MACCAFERRI, 2015)

<b>Características</b>	<b>Valores</b>
Diâmetro (mm)	1,0 ± 0,1
Comprimento (mm)	50,0 ± 0,5
Fator de forma (comprimento/ diâmetro)	50
Nº de fibras/ kg	3244
Resistência à tração de aço (MPa)	>1100
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	7850
Módulo de elasticidade (GPa)	210
Deformação específica na ruptura (%)	<4

Utilizou-se fibra com comprimento de 50 mm, pois o comprimento da fibra deve ser 2,5 a 3 vezes superior ao diâmetro da brita adotada, para o aumento da resistência à tração na flexão de concretos, segundo o fabricante.

## 6.2 EXECUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

### 6.2.1 CORPOS DE PROVA

A TAB. 6.3 apresenta um resumo do tipo e da quantidade de corpos de prova de concreto ensaiados.

TAB. 6.3 – Características dos corpos de prova e seus parâmetros de ensaio.

Fibra	$V_f$ (%)	f (Hz)	RT	Quantidade	
				Prismas	Cilindros
Sem fibra	0,5	5	0,60 e 0,70	12	12
Aço	0,5	5	0,60 e 0,70	12	12

Para se obter os valores de resistência à tração na flexão e de resistência à fadiga na flexão, foram moldados 24 corpos de prova prismáticos de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões, dos quais 12 não possuíam fibras e 12 possuíam fibras de aço.

Também foram moldados 24 corpos de prova cilíndricos de dimensões 100 mm x 200 mm, dos quais 12 continham fibras de aço e outros 12 não. O objetivo foi avaliar as propriedades mecânicas destes concretos em relação à resistência à compressão e resistência à compressão diametral.

### 6.2.2 FÔRMAS

Foram usadas fôrmas metálicas 100 mm x 200 mm para moldar os corpos de prova, enquanto para os espécimes prismáticos de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões, foram utilizadas fôrmas de madeira compensada, como mostra a FIG. 6.2.



FIG. 6.2 – Fôrmas metálicas para os corpos de prova cilíndricos (à esquerda) e de madeira para os prismáticos (à direita).



### 6.2.3 CONCRETAGEM

O preparo do concreto foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção e Concretos do IME, usando uma betoneira de 320 litros, e foi realizado com a seguinte sequência de inserção dos materiais na betoneira: inicialmente a betoneira de eixo inclinado teve sua cuba e pás umedecidas, sendo adicionado todo o agregado graúdo e parte da água de amassamento ( $\pm 1/3$  de água), com o acionamento da betoneira por 1 minuto; em seguida, houve a adição do cimento e da sílica e outra parte de água ( $\pm 1/3$  de água) e a massa de agregados foi misturada por mais 2 minutos; e finalmente foram adicionados o agregado miúdo e fíler calcário e o restante da água, sendo a betoneira acionada por mais 2 minutos e, por fim, adicionamos o superplastificante e misturou-se por mais 10 minutos.

No caso dos concretos com fibras, a adição das mesmas ocorreu logo após a adição do fíler calcário. A FIG. 6.3 ilustra a betoneira de eixo inclinado com capacidade para 320 litros de concreto, utilizada na produção dos concretos. Após a moldagem dos corpos de prova esperou-se um período de 24 horas, foram desmoldados e imersos em tanque com água saturada de cal por 7 dias. Em seguida, foram mantidos sob as condições ambientes do Laboratório até a data dos ensaios.



FIG. 6.3 – Betoneira de 320 litros usada na concretagem

## 6.3 ENSAIOS

### 6.3.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os ensaios de compressão axial centrada foram realizados segundo a norma ABNT NBR 5739 (2007). Os ensaios foram executados na máquina universal de ensaios da marca Contenco, com 1.000 kN de capacidade, do Laboratório de Materiais de Construção e Concretos do Instituto Militar de Engenharia. A velocidade de aplicação de tensão foi de 0,45 MPa/s. Um corpo de prova cilíndrico nas dimensões 100 mm x 200 mm e o referido equipamento estão mostrados na FIG. 6.4.



FIG. 6.4 – Prensa de 1000 kN de capacidade com corpo de prova de concreto

### 6.3.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio de resistência à compressão diametral foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7222 (2011). Os ensaios foram executados na máquina universal de ensaios da marca Contenco, com 1.000 kN de capacidade, do Laboratório de

Materiais de Construção e Concretos do Instituto Militar de Engenharia (v. FIG. 6.5). A velocidade de aplicação de tensão foi mantida a 0,05 MPa/s até a ruptura.

Utilizou-se da expressão da EQ. 6.1 para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a norma ABNT NBR 7222 (2011).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (\text{EQ. 6.1})$$

Onde  $f_{ct,sp}$  é a resistência à tração por compressão diametral, F é a força máxima obtida no ensaio, d é o diâmetro do corpo de prova e l é o comprimento do corpo de prova.



FIG. 6.5 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

### 6.3.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado na prensa servo-hidráulica da marca MTS informatizada e com 100 kN de capacidade, no Laboratório

de Materiais de Construção e Concretos do IME, conforme pode se ver nas FIG. 6.6 e FIG. 6.7.

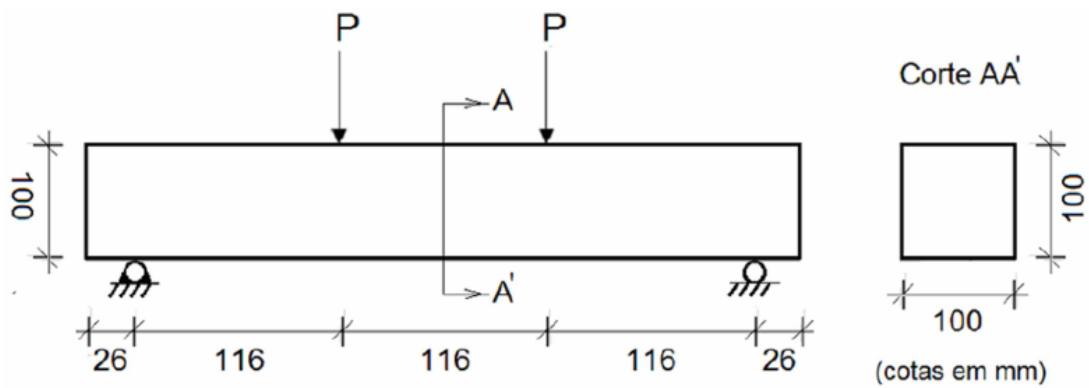


FIG. 6.6 – Esquema estrutural das vigas para os ensaios de flexão.

A resistência à tração na flexão é calculada usando a equação EQ. 6.2, conforme a norma ABNT NBR 12142 (2010).

$$f_{ct,f} = \frac{Fl}{bd^2} \quad (\text{EQ. 6.2})$$

onde  $f_{ct,f}$  é a resistência à tração na flexão, F é a força máxima obtida no ensaio,  $l$  é a dimensão do vão entre apoios,  $d$  é a altura média do corpo de prova e  $b$  é a largura média do corpo de prova.



FIG. 6.7 – Ensaio de resistência à tração na flexão

#### 6.3.4 RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO

Os ensaios de fadiga na flexão foram realizados na prensa servo-hidráulica da marca MTS informatizada e com 100 kN de capacidade, existente no Laboratório de Materiais de Construção e Concretos do Instituto Militar de Engenharia.

A FIG. 6.8 mostra um corpo de prova prismático de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões, biapoiado, com vão livre de 348 mm e submetido a duas cargas concentradas nos terços médios do mesmo, ou seja, distantes entre si de 115 mm de comprimento.



FIG. 6.8 – Ensaio de fadiga à flexão.

No ensaio de fadiga na flexão foi utilizada a frequência de aplicação da carga de 5 Hz e relação de tensão (0,70 e 0,80), isto é, a relação entre a carga máxima aplicada no ensaio e a resistência à tração na flexão estática do concreto. Para a carga mínima aplicada, utilizou-se o valor de 10% da resistência à tração na flexão estática.

## 7 RESULTADOS E ANÁLISE

### 7.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

Os resultados de resistência à compressão axial centrada  $f_c$  dos concretos sem e com fibras ( $V_f = 0,5\%$ ) estão apresentados na TAB 7.1. Verifica-se que, com a adição de fibras de aço o valor médio  $f_{cm}$  aumentou em 8% pois a sua adição faz que as fissuras não se propaguem tão facilmente, dando maior resistência ao concreto.

TAB. 7.1 – Resistência à compressão axial centrada.

<b>LOTE</b>	<b><math>f_c</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{cm}</math> (MPa)</b>	<b>Ganho (%)</b>
Sem fibra	65,9	60,2	-
	63,8		
	50,7		
Com fibra	61,9	65,0	8,0
	66,8		
	66,3		

As FIG. 7.1 e FIG. 7.2 ilustram os corpos de prova cilíndricos de concreto de 100 mm x 200 mm de dimensões após sua ruptura por compressão axial centrada.



FIG. 7.1 – Corpos de prova de concreto sem fibras de aço após sua ruptura por compressão



FIG. 7.2 – Corpos de prova de concreto com fibras de aço após sua ruptura por compressão

## 7.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A TAB. 7.2 apresenta os resultados de resistência à tração por compressão diametral de dois corpos de prova cilíndricos de concreto, sem e com fibras ( $V_f = 0,5\%$ ), de 100 mm x 200 mm de dimensões.

O valor de  $f_{ct,spm}$  de concreto aumentou com o acréscimo de fibras, apresentando um ganho de 48,3%, pois as fibras podem atuar como uma armadura de tração do concreto, sendo tracionadas juntamente com o concreto, dando ganho de resistência a este.

TAB. 7.2 – Resistência à tração por compressão diametral por lote.

<b>LOTE</b>	<b><math>f_{ct,sp}</math> (MPa)</b>	<b><math>f_{ct,spm}</math> (MPa)</b>	<b>Ganho (%)</b>
Sem fibra	4,650	4,703	-
	4,376		
	5,084		
Com fibra	5,513	6,973	48,3
	7,485		
	7,922		

As FIG. 7.3 e FIG. 7.4 ilustram os corpos de prova cilíndricos de concreto de 100 mm x 200 mm de dimensões após sua ruptura por compressão diametral. É possível observar que os corpos de prova de concreto com fibras não se desprenderam, já que estas funcionaram como armadura de tração de concreto conforme visto na FIG. 7.4. Ao contrário do que ocorreu com os corpos de prova sem fibras, em que houve ruptura abrupta e separação em duas partes.





FIG. 7.3 – Corpos de prova de concreto sem fibras após sua ruptura por compressão diametral



FIG. 7.4 – Corpos de prova de concreto com fibras de aço após sua ruptura por compressão diametral.

### 7.3 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova prismáticos de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões sem e com fibras encontram-se na TAB. 7.3, a qual apresenta também ganho de resistência média à tração dos concretos com fibras de aço.

TAB. 7.3 – Resistência à tração na flexão.

LOTE	$f_{ct,f}$ (MPa)	$f_{ct,fm}$ (MPa)	Ganho (%)
Sem fibra	2,218	2,162	-
	1,369		
	2,901		
Com fibra	2,822	3,644	68,5
	4,777		
	3,332		

As FIG. 7.5 e FIG 7.6 ilustram os corpos de prova prismáticos de concreto de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões após sua ruptura estática por flexão. Pode-se notar que a presença de fibras de aço resultou em um ganho de resistência, devido ao fato de que na região da borda inferior, que é submetida à tensões de tração na flexão do concreto com fibras, as fibras podem ter atuado como armadura positiva, dificultando a abertura de fissuras, e também sua propagação, dando ao concreto uma resistência maior na borda crítica do ensaio.

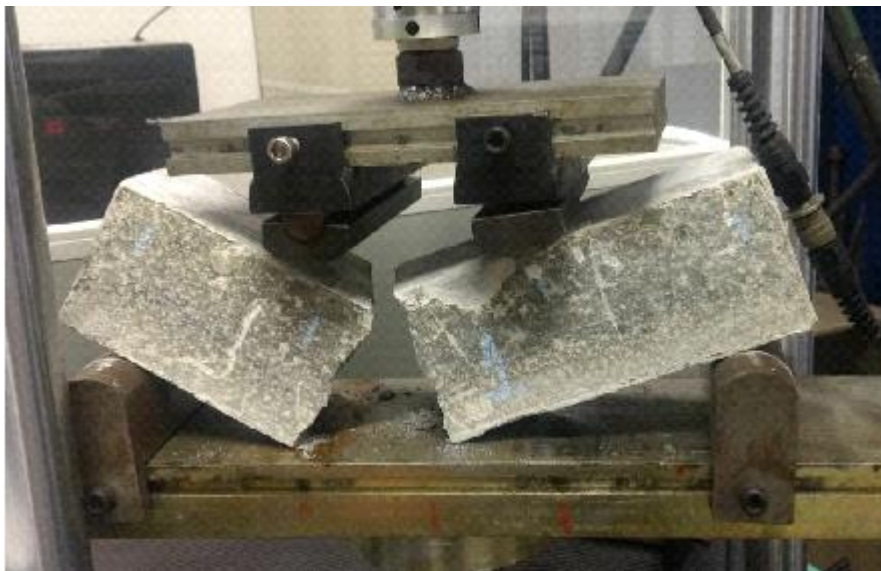


FIG. 7.5 – Corpo de prova de concreto sem fibras após sua ruptura por flexão.



FIG. 7.6 – Corpo de prova de concreto com fibras de aço após sua ruptura por flexão.

#### 7.4 RESISTÊNCIA À FADIGA NA FLEXÃO

A TAB. 7.4 reúne os valores de número de ciclos de fadiga atingidos até a ruptura, ou seja, resistência à fadiga na flexão, de três corpos de prova prismáticos de 100 mm x 100 mm x 400 mm de dimensões, para valores de relação de tensão (RT) iguais a 0,7 e 0,8 e frequência de 5 Hz.

TAB. 7.4 – Número de ciclos de fadiga para frequência de 5 Hz

Lote	f = 5 Hz	
	RT = 0,7	RT = 0,8
	4220	34

<b>Sem fibras</b>	11488	27
	6871	45
<b>Média</b>	7526	35
<b>Desvio padrão</b>	3678	9
<b>Coefficiente de variação</b>	49%	26%
<b>Com fibras</b>	36124	3246
	33006	4098
	30006	2989
<b>Média</b>	33045	3444
<b>Desvio padrão</b>	3059	581
<b>Coefficiente de variação</b>	9%	17%

Pode-se inferir dessa tabela que, com o aumento da relação de tensão (RT), os valores médios de N diminuíram para um mesmo valor de frequência. Também se percebeu que com a adição de fibras, houve acréscimo no número de ciclos para o mesmo valor de frequência e de relação de tensão.

## 7.5 COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS

O ensaio de resistência à tração na flexão determina a resistência à tração na flexão, que, pode ser convertida no valor de resistência à tração direta multiplicando seu valor por 0,7. Já no ensaio de compressão diametral, determina-se o valor da resistência à tração indireta, que é convertido no valor de resistência à tração direta multiplicando seu valor por 0,9, com isso, montou-se a TAB. 7.5 a seguir.

TAB. 7.5 – Comparativo do valor de resistência à tração direta entre os ensaios

<b>Ensaio</b>		<b>Resistencia média à tração direta</b>	<b>Erro</b>
<b>Compressão diametral (CP com fibras)</b>	<b>fct,sp médio (MPa)</b>	6,276	59.4%
	6.973		
<b>Resistência à tração na flexão (CP com fibras)</b>	<b>fct,f médio (MPa)</b>	2,551	
	3,644		

<b>Compressão diametral (CP sem fibras)</b>	<b>fct,sp médio (MPa)</b>		<b>64.2%</b>
	4,703	4,233	
<b>Resistência à tração na flexão (CP sem fibras)</b>	<b>fct,f médio (MPa)</b>		
	2,162	1,513	

## **8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

Para os valores de RT de 0,7 e 0,8, os valores de N dos concretos autoadensáveis sem fibras, para a frequência de 5 Hz, foram iguais a 7526 e 35, nesta ordem. Ao se incorporar fibra de aço, estes valores aumentaram e alcançaram até 33045 e 3444, para  $V_f = 0,50\%$ .

Verificou-se que, com o aumento da relação de tensão (RT), os valores médios de N diminuíram para um mesmo valor de frequência.

Com a adição de fibras no concreto, houve aumento do número de ciclos de fadiga ao se atingir a ruptura do concreto por tração na flexão, para um mesmo valor de frequência e de relação de tensão.

Constataram-se elevados valores de coeficiente de variação para a resistência média à fadiga na flexão do concreto sem fibras, entre 49% e 26%, e valores um pouco mais baixos com fibras de aço, entre 9% e 17%.

Sugerem-se para futuros trabalhos, com o objetivo de esclarecer melhor alguns tópicos, os seguintes assuntos:

- estudo sobre a influência das dimensões dos corpos de prova de concreto autoadensável na sua resistência à fadiga na flexão;
- estudo sobre a influência da variação das relações de tensão e das frequências de carregamento na resistência à fadiga na flexão;
- estudo sobre a influência da relação entre a tensão mínima e a tensão máxima aplicada no corpo de prova de concreto na sua resistência à fadiga na flexão;
- estudo sobre a influência do teor volumétrico de fibras na resistência do concreto autoadensável à fadiga na flexão utilizando maior número de corpos de prova prismáticos para cada relação de tensão e frequência de carregamento.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto autoadensável. Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto autoadensável. Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto autoadensável. Parte 3: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto autoadensável. Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-6**: Concreto autoadensável. Parte 6: Determinação da resistência à segregação - Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro: ABNT, 2017

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011

CAMARGO, Marília Martines de. **Análise da produção de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia, Limeira, 2016.

GOMES, Paulo César Correia; BARROS, Alexandre Rodrigues. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2009.

LUCAS, João Paulo Sousa; SARAIVA, Francisco Michael Gonçalves. **Estudo de concreto autoadensáveis**: Dosagem, propriedades e ensaios. Orientador: Luiz

Antônio Vieira Carneiro. 2014. 63 f. Projeto Final de Curso (Engenharia de Fortificação e Construção) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

MEDEIROS, Arthur. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras.** 2012. 201 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SARAIVA, Rebeca Montenegro Dias de Carvalho. **Resistência à fadiga na flexão de concretos com fibras de aço e de poliolefina para estruturas de defesa.** 2017. 218 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Defesa, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017.

SHIMOSAKA, Tobias Jun. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos autoadensáveis.** 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2017.

SKARENDHAL, A.; PETERSON, O. **Self-compacting concrete. State-of-the-Art.** In: REPORT OF RILEM TECHNICAL COMMITTEE 174-SCC SELF-COMPACTING CONCRETE. RILEM Publications, 2000.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca; DAL MOLIN, Denise Carpena. **Concreto auto-adensável. 1. ed.** São Paulo: Pini, 2008.

TUTIKIAN, Bernardo Fonseca. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** 2004. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.