

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC  
CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC

**THAISE LIMA TOJAL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA DE  
BARRAS DE AÇO EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS**

MACEIÓ

2011

**THAISE LIMA TOJAL**

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA DE  
BARRAS DE AÇO EM CONCRETO AUTOADENSÁVEL  
REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Profº Paulo César C. Gomes  
Co-Orientador: Profº Jean Marie Désir

MACEIÓ  
2011

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
**Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale**

T646c Tojal, Thaise Lima.  
Contribuição ao estudo da aderência de barras de aço em concreto auto-adensável reforçado com fibras metálicas / Thaise Lima Tojal. – 2011.  
*116 f. : il., tabs., grafs.*

Orientador: Paulo Cesar Correia Gomes.

Co-Orientador: Jean Marie Desir.

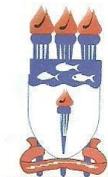
Dissertação (mestrado em Engenharia Civil : Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2011.

*Bibliografia: f. 105-110.*

*Apêndices: f. 11-116.*

1. Concreto auto-adensável . 2. Fibras de aço. 3. Aderências. 3. Engenharia civil. I. Título.

CDU: 624.072.2



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia – CTEC  
Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil – PPGEC



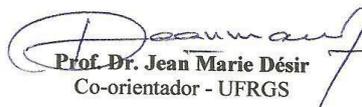
**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ADERÊNCIA DE BARRAS DE AÇO EM  
CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM FIBRAS METÁLICAS**

**THAISE LIMA TOJAL**

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 30 do mês de setembro do ano de 2011.

Banca Examinadora:

  
**Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes**  
Orientador – CTEC/UFAL

  
**Prof. Dr. Jean Marie Désir**  
Co-orientador - UFRGS

  
**Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima**  
CTEC/UFAL

  
**Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral**  
UFC

Campus A. C. Simões, Av. Lourival de Melo Mota, S/N  
Tabuleiro do Martins – CEP 57072-970 – Maceió – Alagoas  
Tel/Fax: (82) 3214-1863  
E-mail: [ppgec@ctec.ufal.br](mailto:ppgec@ctec.ufal.br)  
Homepage: [www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec](http://www.ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgec)

À minha mãe, a minha maior  
incentivadora.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por ter me dado força, fé, saúde e bastante paciência para superar os tantos obstáculos encontrados ao longo desta jornada.

À toda a minha família pelo apoio e palavras de incentivo e encorajamento, à minha tia-madrinha Denilse, ao meu pai Edson Tojal e mais que principalmente a minha mãe Deise Lima. Aos meus amigos que sempre me chamavam para sair nos momentos em que eu precisava estudar, obrigada pela compreensão!

Agradeço profundamente a todos os colegas do mestrado, aos professores que compartilharam conosco muitos conhecimentos que levaremos por toda a nossa vida, aos amigos do laboratório, João, Cícero, Valdemir, Marco, Fábio, Flabel e Sidicley, que me ajudaram imensamente na hora de pegar no pesado. Um especial obrigado para Alexandre Lima e Girley que foram imprescindíveis para a o desenrolar das atividades.

Quero agradecer também aos amigos Karlisson, Fernanda, Romildo, Ítalo, Luiz Henrique, Tassyano, Manu e Daniel que me ajudaram de diversas formas, compartilhando conhecimento, somando forças nas atividades laboratoriais e principalmente tornando este trabalho mais prazeroso, e um muito obrigado à Alexandre Rodrigues de Barros autor do trabalho que me inspirou a elaborar esta pesquisa.

Ao professor Paulo César, por todos os anos de orientação, iniciados muito antes do mestrado, pelo imensurável conhecimento transmitido, pela paciência e dedicação, pela confiança e fé depositada em mim e também por me apresentar o professor Jean Marie Désir que colaborou imensamente na elaboração este trabalho com todo o seu conhecimento. Aos professores Aline Barbosa, Flavio Barboza e Wayne Santos por toda a força dada e conhecimento compartilhado.

Aos amigos da G3 pelo companheirismo e encorajamento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL), pelo financiamento da pesquisa, tornando-a viável.

## RESUMO

Uma das condições de existência atribuídas ao concreto armado como material de construção é a aderência existente entre o concreto e o aço. Essa aderência tem sido motivo de estudos em várias pesquisas que dão origem aos modelos que descrevem matematicamente o comportamento da aderência; apresentam técnicas de ensaios e fazem análise da influência de diferentes fatores que interferem na ligação concreto-aço. Com o avanço tecnológico do concreto surgiram alguns concretos especiais cujas composições contêm o uso de aditivos químicos e minerais, além de fibras, como é o caso dos concretos autoadensáveis e dos concretos reforçados com fibras. Esses concretos especiais têm demonstrado comportamento diferenciado em relação aos concretos convencionais, contribuindo para uma melhora do sistema de ligação concreto-aço. Neste sentido, este estudo utilizou o ensaio de arrancamento de uma barra de aço de um maciço de concreto, seguindo o modelo padrão da RILEM-CEB-FIP (1973) conhecido como Pull Out Test (Bond Test Reinforced Steel), foram utilizados o concreto convencional, o concreto autoadensável e o concreto autoadensável com a incorporação de 1% de fibras metálicas e as barras de aço utilizadas foram as de diâmetro de 10mm e 16mm. As análises foram baseadas nas curvas que descrevem o comportamento da perda da aderência entre o concreto e o aço, das tensões de arrancamento da barra de aço do maciço de concreto e das características apresentadas pelos corpos de prova no decorrer e no final do ensaio. O concreto autoadensável apresentou ganho de capacidade de carga na perda da aderência em relação ao concreto convencional, e a adição das fibras metálicas a este concreto autoadensável promoveu um significativo aumento da carga necessária para arrancar a barra de aço do maciço de concreto, e este apresentou menos avarias ao final deste ensaio se comparado aos corpos de prova dos outros concretos.

Palavras-chave: Concreto Autoadensável. Fibras de Aço. Aderência.

## **ABSTRACT**

One of the conditions of existence assigned to the concrete as a building material is the adhesion between the concrete and steel. This adhesion has been the subject of several research studies that give rise to models that mathematically describe the behavior of adhesion; present testing techniques and in analysis of the influence of different factors that affect the concrete-steel adhesion. With the technological advancement of the concrete there were some special concrete compositions which contain chemical additives and minerals, and fiber, as is the case of self compacting concrete and concrete reinforced with fibers. These special concretes have shown different behavior compared to conventional concrete, contributing to an improved system of steel-concrete adhesion. Thus, this study used the pullout test of a steel bar of a massive concrete, following the standard model of RILEM-CEB-FIP (1973) known as Pull Out Test (Steel Reinforced Bond Test) were used conventional concrete, self compacting concrete and self compacting concrete with the addition of 1% steel fibers and steel bars used were 10mm and 16mm od diameter. The analyses were based on curves that describe the behavior of the loss of adhesion between the concrete and steel, the tension of pullout of the steel rod and the characteristics presented by the massive concrete during and at the end of the research. The self compacting concrete had a gain of lead capacity in the loss of adhesion compared to conventional concrete, and the addition of steel fibers in this concrete promoted a significant increase in the load required to pull the steel bar of the massive concrete, and this had less damage essay, compared to other specimens of concrete

**Keywords:** Self Compacting Concrete. Steel Fibers. Adhesion.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema da concentração de tensões para concreto sem reforço de fibras. ....	30
Figura 2 – Fibras trabalhando como pontes de transferência de tensões .....	30
Figura 3 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico .....	31
Figura 4– Probabilidade de interceptação da fissura em função da compatibilidade dimensional entre fibra e agregado graúdo .....	32
Figura 5 – Comparativo entre a distribuição das fibras de aço no CAA e no concreto vibrado, em diferentes planos .....	36
Figura 6 - Acabamento superficial de fios e barras lisas .....	40
Figura 7 – Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto .....	41
Figura 8 – Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal, devida à exudação e ao acúmulo de água .....	43
Figura 9 – Representação esquemática de resultados de ensaio de arrancamento de barras retas em diferentes posições por ocasião da concretagem	43
Figura 10 – Dimensões dos corpos-de-prova do ensaio de arrancamento .....	44
Figura 11 – Disposição geral do ensaio de arrancamento proposto pela RILEM (1973) .....	45
Figura12 – Ensaio de viga tipo (a).....	46

Figura 13 – Ensaio de viga tipo (b) .....	47
Figura 14 – Ensaio de extremidade de viga .....	47
Figura 15 – Esquema geral de ensaio desenvolvido na USP .....	49
Figura 16 – Etapas do comportamento de ruptura da aderência.....	49
Figura 17 – Situações de boa e má aderência segundo a NBR 6118:2003 .....	50
Figura 18– Curva teórica tensão de aderência-deslizamento .....	51
Figura 19 – Tensões entre fissuras transversais consecutivas .....	52
Figura 20 – Fissuras transversais e de fendilhamento .....	53
Figura 21 – Possível estágio de ruptura da aderência para concreto confinado e barra nervurada .....	54
Figura 22 – Hipótese do mecanismo da resistência de aderência residual XX .....	55
Figura 23 – Surgimento da tensão de aderência .....	56
Figura 24 – Modelo de HARAJLI para curva tensão de aderência x deslizamento	63
Figura 25 – Curva granulométrica dos agregados .....	68
Figura 26 – Resíduo do corte do mármore e do granito, passante na peneira de abertura de 300 µm .....	69
Figura 27 – Curva granulométrica do RCMG .....	70
Figura 28 – Ilustração da fibra de aço utilizada no estudo .....	71
Figura 29 – Esquema dos corpos de prova para barras de aço de $\Phi 10.0\text{mm}$ e $\Phi 16.0\text{ mm}$ .....	72
Figura 30– Formas desmontáveis utilizadas na fabricação dos corpos de prova	73

Figura 31 – Corpos-de-prova com barras de 16mm e 10mm, prontos para o ensaio de arrancamento .....	73
Figura 32 – Esquema do ensaio de espalhamento .....	77
Figura 33 – Detalhe do ensaio de espalhamento do CAA .....	77
Figura 34 – Corpos de prova acomodados para período de endurecimento .....	78
Figura 35 – Adaptação para a vibração dos corpos de prova .....	79
Figura 36 – Corpo de prova concretado cm a barra na posição vertical .....	79
Figura 37 – Ensaio de compressão axial .....	81
Figura 38 – Ensaio do módulo de elasticidade .....	82
Figura 39 – Corpos de prova com barras de 10mm e 16mm para ensaio de ar ....	82
Figura 40 – Equipamentos utilizados para aquisição de dados .....	83
Figura 41 – Ensaio de arrancamento ( <i>Pull Out Test</i> ).....	84
Figura 42 – (a) CP de concreto convencional, (b) CP de concreto autoadensável e (c) CP de concreto autoadensável com fibras após ensaio de compressão axial.....	88
Figura 43 – Corpo-de-prova com perda de aderência por deslizamento .....	90
Figura 44 – Corpo-de-prova apresentando uma rachadura ao longo de seu diâmetro .....	90
Figura 45– Corpo-de-prova quebrado em partes iguais ao longo de seu diâmetro.....	91

Figura 46 – Corpos-de-prova de CAAF com barra de 16mm que apresentaram um alto barulho ao perder a aderência, não apresentam rachaduras.....	91
Figura 47 – Rachadura em corpo-de-prova de concreto autoadensável com fibras com barras de 10 mm.....	92
Figura 48 – Nervuras com concreto após a perda de aderência por deslizamento da barra, para ensaio de arrancamento em corpo-de-prova de CC com barras de 10mm.....	92
Figura 49 – (a) corpo-de-prova de CAAF sendo cortado longitudinalmente, (b) distribuição das fibras no corpo de prova de barra de 16 mm e (c) distribuição das fibras no corpo de prova de barra de 10 mm.....	93
Figura 50 – Gráficos do ensaio de arrancamento para concreto convencional com barra de (a) 10mm e (b) 16mm.....	94
Figura 51 – Gráficos do ensaio de arrancamento para concreto autoadensável com barra de (a) 10mm e (b)16mm.....	95
Figura 52 – Gráficos do ensaio de arrancamento para concreto autoadensável com fibras com barra de 10mm e 16mm.....	96
Figura 53 – Curvas de tensão de aderência x deslocamento para concreto convencional com barra de (a)10mm e (b)16mm no modelo teórico de Barbosa, e teórico de Almeida Filho e experimental.....	99
Figura 54 – Curvas de tensão de aderência x deslocamento para concreto auto adensável com barra de (a)10mm e (b)16mm no modelo teórico de Barbosa, teórico de Almeida Filho experimental.....	100
Figura 55 – Curvas de tensão de aderência x deslocamento para concreto autoadensável com fibras com barra de (a)10mm e (b)16mm no modelo teórico de Barbosa, teórico de Almeida Filho e experimental.....	101

Figura 56 – Curva proposta por Harajli e a curva média experimental para concreto autoadensável com fibras com barras de (a) 10mm e (b)16mm..... 103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de Espalhamento (slump-flow).....	27
Tabela 2 - Classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre).....	27
Tabela 3 – Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre).....	27
Tabela 4 – Classe de habilidade passante caixa L (sob fluxo confinado).....	27
Tabela 5 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado).....	27
Tabela 6 - Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação.....	28
Tabela 7 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.....	28
Tabela 8 – Valores da tensão de aderência obtidos com o ensaio de arrancamento (A) e de viga (V) .....	48
Tabela 9– Caracterização dos agregados .....	68
Tabela 10 – Caracterização do RCMG .....	70
Tabela 11 – Propriedades do superplastificante utilizado no CAA .....	71
Tabela 12 – Dosagens dos concretos utilizados nos ensaios .....	74
Tabela 13 – Classificação das consistências dos concretos .....	75
Tabela 14 – Sequência de colocação dos componentes na betoneira.....	75
Tabela 15 – Principais diferenças entre os concretos estudados .....	76
Tabela 16 – Resultado do ensaio de espalhamento do CAA e CAAF .....	85
Tabela 17 – Resultado do ensaio de compressão, desvio padrão e coeficiente de variação para os corpos de prova de CC, CAA e CAAF .....	86
Tabela 18 – Resultado do ensaio do módulo de elasticidade .....	89

Tabela 19 – Carga última aplicada aos corpos de prova durante o ensaio de arrancamento de barra .....	90
Tabela 20 – Valores máximos da tensão de aderência atingida pelo modelo de Barbosa (2001), Almeida Filho (2006) e pelo modelo experimental ...	99
Tabela 21 – Valores máximos da tensão de aderência segundo a NBR 6118:2003 e pelo modelo experimental .....	104
Tabela 22 – Análise do Comportamento do Aço .....	105

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland;

ACI: American Concrete Institute;

ASTM: American Society for Testing and Materials;

CAA: Concreto Autoadensável;

CAARFA: Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras de Aço;

CC: Concreto convencional;

CEB: Comité Euro-International du Béton;

CP: Corpo-de-Prova;

EFNARC: European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems;

FIP: Federation Internationale de la Précontrainte;

GPa: Giga Pascal;

LVDT: Linear Variable Differential Transformer

MPa: Mega Pascal;

NBR: Norma Brasileira Registrada;

pH: potencial hidrogeniônico;

PLC: Plastificante;

PVC: cloreto de polivinila;

RCMG: Resíduo do Corte do Mármore e Granito;

RILEM: Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les constructions;

SCC: Self-compacting concrete;

SPC: Superplastificante

UFAL: Universidade Federal de Alagoas;

## LISTA DE SÍMBOLOS

$L_c$ : comprimento crítico da fibra;

$\mu$ : microns;

$\tau_0$ : tensão de aderência;

$\sigma_y$ : tensões radiais de compressão;

$\sigma_x$ : longitudinais de tração;

$\sigma_i$ : tensões diagonais de tração;

$\sigma_t$ : tensões de tração circunferenciais;

$\sigma_c$ : tensão de compressão;

$\varnothing$ : diâmetro da barra;

$E_c$ : módulo de elasticidade do concreto;

$E_s$ : módulo de elasticidade do aço;

$f_{ct}$ : resistência do concreto à tração;

$\gamma_c$ : coeficiente de ponderação da resistência do concreto;

$f_{ct,m}$ : resistência média à tração do concreto;

$f_{ck}$ : resistência característica à compressão do concreto;

$T_{50}$ : tempo necessário para o concreto autoadensável atingir a marcação de 50 cm;

$A_s$ : área da seção transversal da barra de aço;

$\delta$ : deslocamento;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Capítulo 1: Considerações Iniciais.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>22</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>22</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura da Dissertação .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>Capítulo 2: Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>24</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2</b>	<b>Concreto Autoadensável .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Concreto Reforçado com Fibras Metálicas .....</b>	<b>29</b>
2.3.1	Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras Metálicas .....	34
<b>2.4</b>	<b>Aderência .....</b>	<b>39</b>
2.4.1	<b>Tipos de Aderência .....</b>	<b>39</b>
2.4.2	Parâmetros que Influenciam na Aderência .....	41
2.4.3	Tipos de Ensaio .....	44
2.4.3.1	Ensaio de Arrancamento .....	44
2.4.3.2	Ensaio de Viga .....	46
2.4.3.3	Ensaio das 4 Barras .....	48
2.4.4	Mecanismos de Ruptura .....	49
2.4.5	Regiões Favoráveis ou Desfavoráveis Quanto à Aderência .....	50
2.4.6	Modelos para o Comportamento da Aderência .....	51
2.4.7	Cálculo da Tensão de Aderência .....	55
2.4.8	Modelagem da Curva Tensão de Aderência x Deslizamento .....	60
2.4.8.1	Modelo Proposto por Barbosa (2001) .....	60
2.4.8.2	Modelo Proposto por Almeida Filho (2006) .....	62

2.4.8.3	Modelo Proposto por Almeida Filho (2006) .....	62
<b>3</b>	<b>Capítulo 3: Programa Experimental .....</b>	<b>67</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>67</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>67</b>
<b>3.3</b>	<b>Produção das Formas .....</b>	<b>72</b>
<b>3.4</b>	<b>Produção dos Concretos .....</b>	<b>74</b>
3.4.1	Dosagem dos Concretos .....	74
3.4.2	Fabricação do Concreto .....	74
<b>3.5</b>	<b>Ensaio no Estado Fresco .....</b>	<b>76</b>
<b>3.6</b>	<b>Ensaio no Estado Fresco .....</b>	<b>78</b>
<b>3.7</b>	<b>Cura dos Corpos de Prova .....</b>	<b>80</b>
<b>3.8</b>	<b>Ensaio no Estado Endurecido .....</b>	<b>81</b>
<b>4</b>	<b>Capítulo 4: Resultados e Análises dos Resultados.....</b>	<b>85</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>85</b>
<b>4.2</b>	<b>Propriedades no Estado Fresco .....</b>	<b>85</b>
<b>4.3</b>	<b>Propriedades no Estado Endurecido .....</b>	<b>86</b>
<b>4.4</b>	<b>Modelos para a curva Tensão de Aderência x Deslizamento .....</b>	<b>97</b>
4.4.1	Curvas comparativas do ensaio experimental e do modelo proposto por Barbosa (2001) .....	98
4.4.2	Modelo para Concreto com Fibras .....	102
<b>4.5</b>	<b>Prescrição da NBR 6118 para Tensão de Aderência .....</b>	<b>103</b>
<b>4.6</b>	<b>Análise do Comportamento do Aço .....</b>	<b>104</b>

<b>5</b>	<b>Capítulo 5: Considerações Finais.....</b>	<b>106</b>
<b>5.1</b>	<b>Sugestões para Trabalhos Futuros .....</b>	<b>108</b>
<b>6</b>	<b>Capítulo 6: Referências .....</b>	<b>109</b>

## Capítulo 1: Considerações Iniciais

### 1.1. Introdução

Desde a invenção do concreto armado, no final do século XIX, a aderência entre aço e concreto tem sido estudada, essa que impede que haja escorregamento de uma barra de aço em relação ao concreto que a envolve. A transferência de esforços entre concreto e aço, bem como a compatibilidade de deformações entre eles são fundamentais para a existência do concreto armado, que é possível por causa da aderência.

A aderência é representada usualmente pela relação da tensão de aderência e o deslizamento relativo da barra no concreto. A primeira é identificada idealizadamente pela tensão de cisalhamento na interface barra-concreto e, o segundo, pelo deslocamento relativo entre a armadura e o concreto.

No estudo da relação entre a tensão de aderência e o deslizamento utilizam-se ensaios de extração de barra de armadura embutidas em corpo-de-prova de concreto. Esses ensaios, de uma maneira geral, permitem avaliar o comportamento da aderência até a sua ruptura total.

As variáveis associadas à barra de aço que podem influenciar o estudo da aderência entre o aço e o concreto são em geral: o diâmetro, tipo e disposição das nervuras, o estado superficial das barras, a posição das barras da armadura em relação à direção de concretagem, entre outras. No que se referem ao concreto destacam-se: fator água/cimento (resistência à compressão e à tração), as adições minerais, o tipo de agregado, o adensamento e a idade do carregamento.

Na década de 80, no Japão, foi proposto um protótipo de mistura de concreto que, diferentemente das misturas convencionais tinha a capacidade de se autoadensar apenas com seu peso próprio, dando origem ao concreto autoadensável (CAA). Este concreto possuía algumas outras vantagens como a redução do tempo de concretagem, maior produtividade, menor tempo de execução da obra e ambiente de trabalho mais saudável. Tudo se deve ao alcance de um alto desempenho no estado fresco, que atende a três propriedades características: capacidade de preenchimento, habilidade de passagem por obstáculos e resistência à segregação, GOMES e BARROS (2009).

Conhecendo estas propriedades do CAA portanto, decidiu-se aliar a este as vantagens obtidas com a incorporação de fibras metálicas distribuídas aleatoriamente na massa de concreto. Segundo KIM e MAI (1998), nos materiais compósitos com fibras, a matriz e as fibras mantêm suas identidades físicas e químicas originais, além disso, juntas elas produzem uma combinação de propriedades mecânicas que não pode ser alcançada com cada um dos constituintes atuando sozinho, devido à presença de uma interface entre esses dois constituintes.

Segundo BENTUR e MINDES (1990), a eficiência das fibras pode ser julgada com base em dois critérios: aumento na resistência e aumento na tenacidade do compósito, em relação à matriz quebradiça. Ainda segundo os mesmos autores, a eficiência das fibras na melhora das propriedades mecânicas da matriz de cimento quebradiça é regida por: (1) o processo de transferência de tensões da matriz para a fibra; e (2) o efeito de ponte de tensões que as fibras apresentam através das fissuras da matriz, e que ocorre num estágio mais avançado de carregamento.

A utilização neste trabalho de três tipos de concreto (concreto convencional, concreto autoadensável e concreto autoadensáveis reforçado com fibras de aço), visa contribuir com o estudo do comportamento da aderência aço-concreto do concreto autoadensável com e sem fibras através do ensaio de arrancamento de uma barra de aço de um corpo de prova.

## 1.2. Justificativa

O concreto autoadensável é um tipo de concreto que vem ganhando espaço nas obras brasileiras em virtude das vantagens oferecidas, e, apesar de existir na literatura vários estudos a respeito da utilização do concreto autoadensável, inclusive com a incorporação de fibras metálicas, o estudo da aderência aço-concreto autoadensável com fibras metálicas ainda é escasso.

Desta forma, como contribuição ao estudo da aderência aço-concreto, este trabalho propôs uma análise comparativa do comportamento de corpos de prova de concreto autoadensável com e sem fibras metálicas no decorrer do ensaio de arrancamento de barra de aço do maciço de concreto, através de gráficos contendo curvas geradas com os parâmetros tempo, deslocamento e carga.

## 1.3. Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa é analisar experimentalmente o comportamento da aderência aço-concreto em concreto autoadensável com e sem fibras metálicas. Os principais pontos trabalhados foram:

- Conhecer a relação entre as propriedades de aderência de barras de aço de bitolas variadas;
- Aprofundar o conhecimento da incorporação de fibras metálicas em concreto, em especial no concreto autoadensável, observando quais são as características que variam positiva e negativamente com a introdução deste material;
- Analisar comparativamente o comportamento da aderência aço-concreto, tendo como variáveis o tipo de concreto, o diâmetro nominal da barra de aço e a incorporação de fibras metálicas, observando para quais situações a utilização destas variáveis produz ganhos significativos.
- Conhecer o comportamento do concreto autoadensável com e sem fibras metálicas, comparando com o comportamento do concreto convencional, em relação ao arrancamento de barras.
- Confrontar os resultados experimentais obtidos com os modelos da literatura.

## **1.4. Estrutura da Dissertação**

O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre a aderência entre a barra de aço e o concreto, sobre o CAA e sobre o uso de fibras no concreto, além de expor a justificativa e os objetivos buscados com a produção deste trabalho.

No capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica, etapa que aprofundou e expandiu os conhecimentos essenciais para nortear a realização de todas as etapas do trabalho. Neste capítulo, encontram-se o estado da arte do concreto autoadensável com e sem a incorporação de fibras metálicas e a aderência, com seus tipos, parâmetros e ensaios, além de modelos de comportamento.

O programa experimental é apresentado no capítulo 3, onde são descritos os materiais utilizados, a produção das formas, a produção dos concretos e corpos de prova e os ensaios realizados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios, as discussões pertinentes e um estudo do comportamento do aço.

No capítulo 5 é apresentada uma conclusão dos resultados alcançados, analisando-os com as informações obtidas na revisão bibliográfica, além de algumas sugestões para trabalhos futuros.

O capítulo 6 traz as referências utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

## **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica**

### **2.1. Introdução**

Neste tópico, apresenta-se uma a revisão bibliográfica desenvolvida sobre o concreto autoadensável, em seguida sobre a utilização de fibras metálicas no concreto convencional e autoadensável e na sequencia um estudo sobre aderência, abordando seus tipos, os parâmetros que a influenciam, os principais tipos de ensaios utilizados para a caracterização das relações constitutivas envolvidas, as formulações dentre outros.

O estudo bibliográfico foi o suporte necessário para a realização deste trabalho de pesquisa no que diz respeito ao conhecimento dos materiais utilizados, procedimentos para produção dos concretos e realização dos ensaios, e principalmente para a análise dos resultados obtidos e formulação de conclusões.

### **2.2. Concreto Autoadensável**

Com a ampliação do campo de utilização do concreto, surgiram problemas no processo de adensamento, decorrentes principalmente da complexidade das estruturas executadas. Surgiu então, a necessidade de se desenvolver um concreto que apresentasse um grau de consistência capaz de dispensar o adensamento MELO (2005) apud OKAMURA (1997).

A partir de 1983, na Universidade de Tóquio, o Prof. Okamura, com o objetivo de minimizar tal problema, iniciou seus estudos buscando obter um concreto especial capaz de se adensar sem a necessidade de nenhum tipo de vibração mecânica, dando origem a um concreto denominado autoadensável, onde seu primeiro protótipo foi realizado em 1988, OKAMURA (1997), GOMES (2002). Após uma década de utilização no Japão, o CAA surge na Europa em meados dos anos 90, mais precisamente na Suécia e na Holanda, onde foi empregado em aplicações de concreto “in loco”, OKAMURA e OUCHI (1999). Segundo GOMES (2002), este concreto especial teve rápida aceitação no mercado europeu.

Desde então, este concreto vem sendo aplicado com sucesso em peças com grandes concentrações de armação, como vigas de pontes e blocos de ancoragem em construções industriais além de lajes e pilares e, sobretudo em peças pré-moldadas pelo seu excelente acabamento. Por dispensar o uso do vibrador, é amplamente usado em grandes centros urbanos, onde não se pode fazer barulho, permitindo que a concretagem ocorra em horários noturnos. A maior aplicação em obras civis do CAA ocorreu em 1997 no Japão, com a concretagem das ancoragens de concreto da ponte metálica de maior vão livre do mundo com 1991 metros, a ponte Akashi-Kaikyo inaugurada em 1998. No Brasil, a primeira grande concretagem utilizando o CAA ocorreu em uma obra de edificação em Goiás em dezembro de 2004.

As aplicações do CAA citadas acima são decorrentes de três características distintas: fluidez, viscosidade e resistência à segregação. A fluidez caracteriza a facilidade com que o concreto flui através da armadura; a viscosidade garante que as partículas sejam suspensas e se movimentem sem atrito e choque, impedindo a colisão e proporcionando uma distribuição uniforme à resistência a segregação juntamente com a coesão dos componentes tem a finalidade de impedir a ocorrência de separação dos componentes levando a uma segregação da mistura BARBOSA *et al.* (2004).

O concreto autoadensável no estado fresco deve apresentar uma composição coesa, distribuição uniforme dos agregados e não apresentar exsudação e segregação. Para sua elaboração, além dos materiais utilizados no concreto convencional como, cimento, areia, agregado graúdo e água, o CAA requer o uso de outros materiais como aditivos químicos e minerais e grande quantidade de finos, os quais introduzidos na mistura resultam nas características mencionadas acima.

A eliminação da necessidade de vibração e os materiais incorporados à mistura agregam benefícios ao concreto autoadensável, tanto no estado fresco, tais como redução de custos e melhoria no ambiente de trabalho no momento de lançamento do concreto nas formas, quanto no estado endurecido, como a menor porosidade apresentada em sua microestrutura, o que favorece as propriedades mecânicas e de durabilidade. A incorporação de fibras de aço ao concreto

autoadensável pode elevar consideravelmente essas propriedades TORRIJOS *et al* (2008), principalmente por se tratar de um compósito fibroso com condições de matriz muito favoráveis.

Porém, segundo PEREIRA *et al.* (2008), alguns entraves são apresentados na incorporação de fibras ao concreto autoadensável, onde, o mais relevante é a perturbação da habilidade de fluxo do concreto fresco. Entretanto, tal obstáculo serviu de motivação para o surgimento de métodos de dosagem de CAA com a consideração da adição de fibras à mistura, como por exemplo, os estudos de FERRARA *et al.* (2007) e PEREIRA *et al.* (2008). Além disso, investigações têm constatado a possibilidade de uso das fibras em misturas de CAA padrão já obtidas, respeitando aspectos relacionados ao tipo e volume adicionado de fibras, sem prejuízos acentuados das propriedades de autoadensabilidade do concreto, BARROS (2009).

Em 2010 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) lançou a NBR 15823 que trata especificamente do concreto autoadensável, esta foi dividida em 6 partes discriminadas abaixo:

- ✓ 15823-1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco;
- ✓ 15823-2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams;
- ✓ 15823-3: Determinação da habilidade passante – Método do J-ring;
- ✓ 15823-4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L;
- ✓ 15823-5: Determinação da viscosidade – Método do funil V ;
- ✓ 15823-6: Determinação da resistência à segregação;

A NBR 15823:1 em seu item 5 classifica o CAA em função das propriedades no estado fresco conforme as Tabelas de 1 a 6

**Tabela 1 – Classes de Espalhamento (slump-flow)**

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF1	550 a 650	ANBT NBR 15823 - 2
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

**Tabela 2 - Classes de viscosidade plástica aparente t500 (sob fluxo livre)**

Classe	t500 (s)	Método de ensaio
VS1	$\leq 2$	ANBT NBR 15823 - 2
VS2	$> 2$	

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

**Tabela 3 – Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre)**

Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ1	0 a 25 com 16 barras de aço	ANBT NBR 15823 - 3
PJ2	25 a 50 com 16 barras de aço	

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

**Tabela 4 – Classe de habilidade passante caixa L (sob fluxo confinado)**

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL1	$\leq 0,80$ , com duas barras de aço	ANBT NBR 15823 - 34
PL2	$\leq 0,80$ , com três barras de aço	

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

**Tabela 5 – Classes de viscosidade plástica aparente pelo funil V (sob fluxo confinado)**

Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF1	$< 9$	ANBT NBR 15823 - 5
VF2	9 a 25	

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

**Tabela 6 - Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação**

Classe	Coluna de segregação (%)	Método de ensaio
SR1	$\leq 20$	ANBT NBR 15823 - 6
SR2	$\leq 15$	

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

Em seu anexo A.2.1 a NBR 15823-1 mostra 3 classes de espalhamento, como mostrado na Tabela 7, que fornecem indicações da fluidez do CAA e de sua habilidade de preenchimento em fluxo livre.

**Tabela 7 – Classes de espalhamento do CAA em função de sua aplicação.**

Classe de espalhamento	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF1	550 a 650	Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. CAA bombeado Estruturas que exigem uma curta distancia de espalhamento horizontal do CAA	Lajes  Revestimento de túneis Estacas e certas fundações profundas
SF2	660 a 750	Adequada para a maioria das aplicações correntes	Paredes, vigas, pilares e outras
SF3	760 a 850	Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5mm)	Pilares-parede  Paredes-diafragma  Pilares

FONTE: NBR 15823-1 (2010)

### 2.3. Concreto Reforçado com Fibras Metálicas

Dentre a família das fibras metálicas, as mais comuns são as fibras de aço. Seu formato pode ser bastante variável, com o objetivo de aumentar a aderência com a matriz cimentícia. Estas fibras têm sido utilizadas em um número considerável de pesquisas, como forma de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais de construção.

A resistência à tração da fibra metálica é da ordem de 1,1 GPa e o módulo de elasticidade é igual a 200 GPa, VENDRUSCOLO (2003). O mecanismo de ruptura de um compósito reforçado por fibra metálica é geralmente associado ao arrancamento destas fibras e não ao rompimento das mesmas.

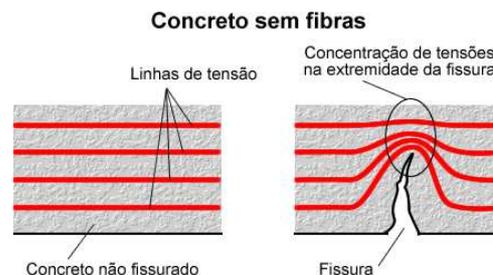
Dependendo do meio onde se inserem, estas fibras podem apresentar problemas de corrosão. Uma técnica desenvolvida para minimizar este problema é o banho de níquel. O concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) vem sendo utilizado com sucesso em muitas aplicações, como pavimentação JOHNSTON (1984), VANDENBERGUE e NEMEGEER (1985), recuperação e restauração de pontes e pavimentos CHANVILLARD *et al.* (1989), JOHNSTON e CARTER (1989), JOHNSTON (1995), LUPIEN *et al.* (1995), NUNESE *et al.* (1997), concreto projetado FIGUEIREDO (1997), entre outras. O sucesso do CRFA nestas aplicações se deve à sua boa capacidade de absorção de energia durante a ruptura ou, em outras palavras, à sua tenacidade.

O principal papel das fibras no CRFA é agir como ponte de transferência de tensões através das fissuras, BENTUR e MINDES (1990). Após a ruptura da matriz de concreto, as fibras, enquanto atuam como pontes, sofrem um processo de arrancamento que demanda uma quantidade extra de energia para deformação e ruptura do compósito, proporcionando uma maior tenacidade. Entretanto, a eficiência da fibra de aço para o aumento da tenacidade do compósito depende de sua interação com a matriz, que garante a transferência de tensões da matriz para as fibras e vice-versa.

Diversos fatores podem influenciar as propriedades mecânicas dos concretos com fibras de aço. Dentre estes fatores os principais são a interação fibra/matriz, o comprimento das fibras e orientação e volume das fibras no concreto.

*Interação entre fibras de aço e matriz de concreto:* No momento em que o concreto fissura, a tensão que antes atravessava aquele trecho desviará seu percurso para outra região mais próxima que possibilite sua propagação, ou seja, na extremidade da fissura, conforme Figura 1. Assim, há uma concentração das tensões na ponta da abertura, onde, no instante em que esta tensão superar a resistência do concreto, ocorrerá a ruptura frágil do material.

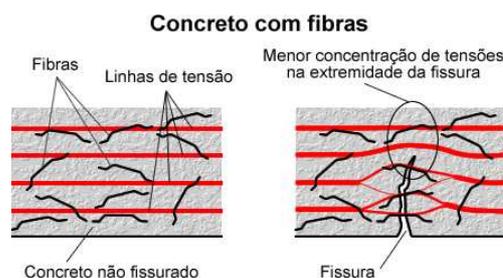
**Figura 1 – Esquema da concentração de tensões para concreto sem reforço de fibras.**



Fonte: BARROS (2009).

Quando as fibras são adicionadas ao concreto, atuam como “pontes” de transferência de tensões entre as seções da fissura, causando uma redução nas concentrações das tensões na extremidade desta, conforme Figura 2. Com isto, a velocidade de propagação das fissuras no concreto é bastante reduzida e o material passa a ter um comportamento pseudo-dúctil, ou seja, apresenta certa capacidade portante pós-fissuração, FIGUEIREDO (2000).

**Figura 2 - Fibras trabalhando como pontes de transferência de tensões.**

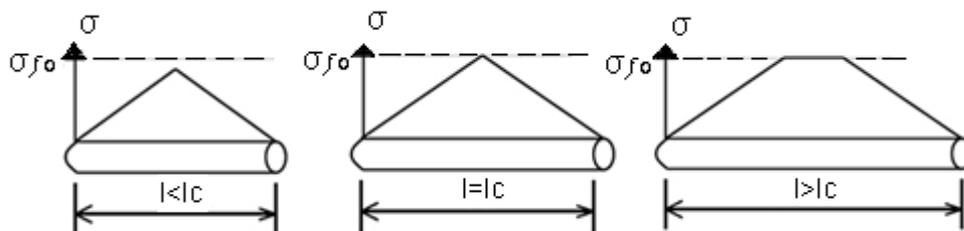


Fonte: BARROS (2009).

A ruptura do material reforçado com fibras ocorre por alongamento elástico ou plástico das fibras, por degradação da matriz de concreto na zona de transição fibra/matriz, por deslizamento da fibra ou por sua ruptura, OLIVEIRA (2005).

Comprimento das fibras: A definição do comprimento crítico ( $l_c$ ) está baseada no modelo que descreve a transferência de tensão entre a matriz e a fibra como aumentando linearmente dos extremos para o centro da fibra. Esta tensão é máxima quando a tensão a que está submetida a fibra se iguala à tensão de cisalhamento entre a fibra e a matriz, FIGUEIREDO (2000). Na Figura 3 encontram-se apresentadas as situações possíveis de distribuição de tensão na fibra em relação ao comprimento crítico:  $l = l_c$ ,  $l > l_c$  e  $l < l_c$ , onde  $l$  = comprimento da fibra.

**Figura 3 – Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico.**



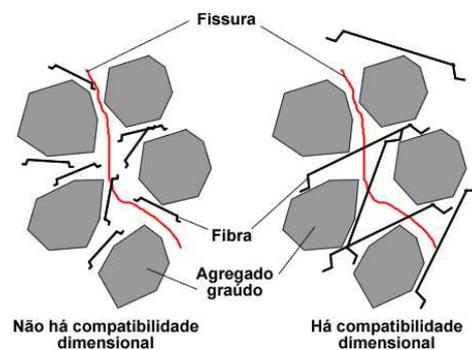
Fonte: BENTUR; MINDESS apud FIGUEIREDO (2000) adaptado.

Quando a fibra possui um comprimento menor que o crítico, a carga de arrancamento proporcionada pelo comprimento embutido na matriz não é suficiente para produzir uma tensão que supere a resistência da fibra. Nesta situação, com o aumento da deformação e conseqüentemente da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões pela fissura será arrancada do lado que possuir menor comprimento embutido. Este é o caso normalmente encontrado para as fibras de aço no concreto de baixa e moderada resistência. Quando se tem um concreto de elevada resistência mecânica, melhora-se a condição de aderência entre a fibra e a matriz e, nestes casos, é possível ultrapassar o valor do comprimento crítico causando rupturas de algumas fibras.

Deve-se considerar ainda o aspecto da probabilidade da fissura ser interceptada pela fibra, e neste sentido, o comprimento da fibra deve ser avaliado em relação à compatibilidade dimensional com o agregado graúdo MAIDL *apud* NUNES (2006), conforme apresentado na Figura 4.

Desta forma, pelo fato da fissuração do concreto se propagar preferencialmente na região próxima a interface entre o agregado graúdo e a matriz, recomenda-se que o comprimento da fibra seja duas vezes maior que a dimensão máxima característica do agregado graúdo, para evitar que o efeito de reforço da fibra de aço no compósito seja prejudicado CHENKUI e GUOFAN *apud* NUNES (2006). Além disso, alguns trabalhos da literatura recomendam que a máxima dimensão dos agregados não deva ser superior a 20 mm, EVANGELISTA (2003).

**Figura 4 – Probabilidade de interceptação da fissura em função da compatibilidade dimensional entre fibra e agregado graúdo**



Fonte: BARROS (2009).

Se as fibras forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia, e em quantidade suficiente, elas ajudarão a manter pequena a abertura das fissuras, desta forma diminui a penetração de agentes agressivos com conseqüente aumento, da durabilidade da estrutura.

Para que haja corrosão da armadura no concreto deve haver uma diferença de potencial, a qual pode ser originada por diferenças de concentração iônica, umidade, aeração, tensão no aço ou no concreto. HELENE (1993) aponta que a corrosão localizada, apesar de intensa e perigosa, é originada quando os ânodos

são de dimensões reduzidas e estáveis, sendo, portanto, rara no concreto armado. Tanto maior será a dificuldade de se encontrar uma diferença de potencial numa armadura quanto menores forem suas dimensões. Assim é o caso da fibra comparada com a armadura convencional com barras contínuas. Este fato é confirmado por pesquisas que induziram a um severo ataque o concreto armado, com fibras. NETUR E MINDES (1990) relatam uma série de pesquisas onde o desempenho do concreto reforçado com fibras foi superior ao convencional, seja com ataques severos de cloretos, seja por efeito de congelamento. Mesmo com o concreto fissurado a fibra apresenta uma capacidade resistente à corrosão, como apontou o estudo desenvolvido por CHANVILLARD *et al.* (1989), que não observou sinais de corrosão e perda de seção transversal por este fenômeno quando a abertura de fissuras nos pavimentos não ultrapassou 0,2mm.

As dúvidas com relação à durabilidade do concreto reforçado com fibras de aço, porém são frequentes e, em grande parte, não estão tecnicamente embasadas. Isto se deve ao fato natural de se observar fibras oxidadas na superfície de pavimentos e túneis, ou mesmo daquelas que se perdem durante a reflexão do concreto projetado. No entanto, é conveniente que se destaque o fato das fibras de aço não receberem nenhum tratamento especial para evitar a corrosão, logo a sua durabilidade está condicionada do seu confinamento no meio fortemente, alcalino (pH em torno de 12,5) do concreto, onde permanecerá passivada.

Estudos reportados por METHA e MONTEIRO (1994) envolvendo ensaios de durabilidade a longo prazo, mostraram que as fibras no concreto apresentaram mínimos sinais de corrosão e nenhum efeito deletério nas propriedades do concreto após sete anos de exposição a ataque de sais de descongelamento. Assim, a corrosão das fibras na superfície do concreto está associada à carbonatação do concreto que se inicia justamente nesta região mais próxima da atmosfera e força a redução do pH. Quando o mesmo atinge o valor de 9 o aço é despassivado e principia-se a corrosão, OLLIVIER (1998). No entanto, isto, vem a indicar a necessidade de previsão de um recobrimento, que pode ser até uma camada de sacrifício que, garantirá uma seção mínima de trabalho para a estrutura durante a sua vida útil.

Com relação à aderência concreto e armadura, a maioria dos pesquisadores concorda que a tensão de aderência máxima aumenta quando se usa fibra de aço, no caso de ruptura por fendilhamento. Não há, no entanto, consenso de quanto seria este aumento para um dado volume de fibras utilizado. Outro ponto que há discordância é o em relação a influência das fibras no caso da ruptura por arrancamento, VLIETE (2001).

Em um trabalho conduzido por CATTANEO (2000), investigou-se a tensão de aderência e tipo de ruptura de corpos-de-prova de CAD com fibras de aço.

Os resultados obtidos com 1% de fibra de aço ao concreto indicam um aumento de 20% na tensão de aderência em relação ao concreto sem fibras. No caso da ruptura por arrancamento, os testes mostraram também um aumento na tensão de aderência. A propagação das fissuras internas de fendilhamento foi mais lenta no caso do concreto com fibras e estas fissuras foram localizadas mais próximas da barra. Ao contrario do que ocorre no concreto simples, a ruptura por fendilhamento não separa o corpo de prova em duas partes, devido a ação das fibras.

### **2.3.1. Concreto Autoadensável Reforçado com Fibras Metálicas**

A trabalhabilidade do concreto autoadensável fibroso é determinada pela dosagem de superplastificante e pela relação água/materiais em pó. O concreto autoadensável reforçado com fibras é também sensível ao tipo e volume das fibras e às propriedades dos agregados, além de adquirir propriedades de resistência favoráveis. Este concreto pode possibilitar a diminuição da quantidade de armadura convencional de uma estrutura, e apresenta facilidade de lançamento e boas propriedades reológicas. Essas propriedades de resistência e reologia que a adição de fibras confere ao concreto autoadensável podem ser extremamente benéficas para a construção civil.

O volume de agregado graúdo empregado na mistura influencia na trabalhabilidade do concreto. Um volume maior de fibras pode ser adicionado na mistura, tanto quanto maior for o volume de agregados finos. Baron apud Grünewald; WALRAVEM (2001) presumiam que a maioria dos concretos

trabalháveis eram obtidos com a otimização do esqueleto granular. A otimização da proporção de agregado graúdo independe do volume e das propriedades da pasta no concreto autoadensável reforçado com fibras de aço (CAARFA). Substituiu-se agregado graúdo por agregado miúdo por tentativa e erro, obtendo-se o volume final de agregado graúdo na mistura que apresente a maior trabalhabilidade. Esta relação depende do tipo e do volume de fibras. Por fim ajustam-se a água, o cimento e o superplastificante para atingir o desempenho e a trabalhabilidade desejados.

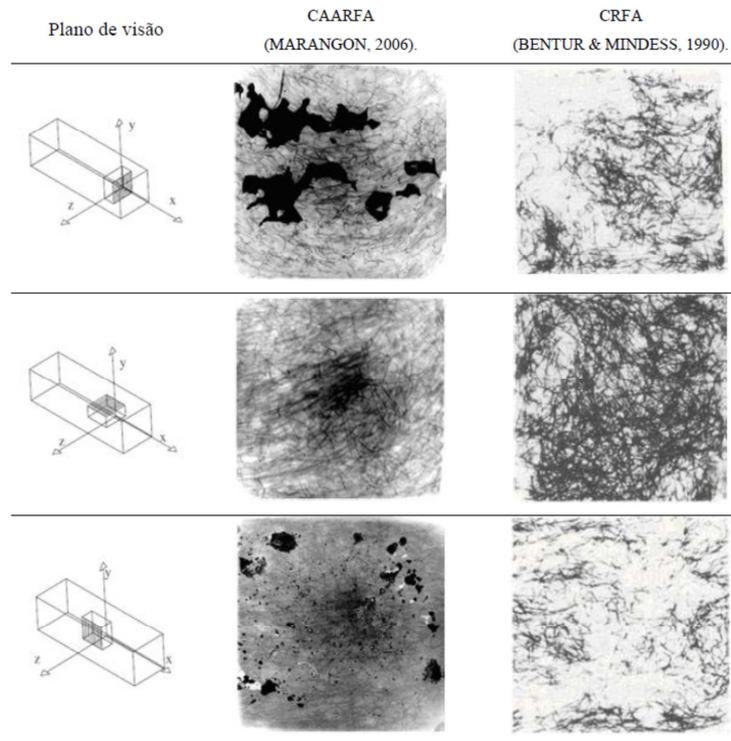
O concreto autoadensável reforçado com fibras possui melhores propriedades e características mecânicas no estado endurecido que o concreto autoadensável sem a presença das fibras. O concreto é um material frágil quando submetido à tração, sendo que esse comportamento pode ser melhorado pela adição de fibras descontínuas orientadas randomicamente, prevenindo ou inibindo a propagação de fissuras. As características e o desempenho do concreto autoadensável com fibras variam, dependendo das propriedades do concreto e das características das fibras. A eficiência do reforço está relacionada com a otimização da fração volumétrica, geometria, orientação e a distribuição das fibras SAHMARAN e YAMANI (2005). OLIVEIRA *et al.* (2000) constataram que a contribuição de 0,5 % de fibras de aço adicionado ao CAARFA poder ser considerada como uma contribuição equivalente de uma determinada área de armadura passiva.

Segundo GRÜNEWALD e WALRAVEM (2003) o efeito no processo de lançamento pode interferir na orientação e distribuição das fibras. As fibras tendem a ficar orientadas na direção perpendicular à direção do fluxo de lançamento do concreto. Para o mesmo volume de fibras, fibras alinhadas no plano considerado são mais efetivas no desempenho mecânico que fibras distribuídas randomicamente. Entretanto, o CAARFA com fibras distribuídas randomicamente é mais efetivo no que tange à obtenção de elementos estruturais submetidos a diferentes esforços.

Através da análise de fotos de raio-X de corpos de prova de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço, CAARFA, foi verificado que a distribuição das fibras é similar ao observado em concretos reforçados com fibras de aço CRFA, TVIKSTA (2000). Na Figura 5 são apresentadas imagens de raio-X de

CAARFA, contendo fração volumétrica de fibras de 1%, obtidas por MARAGON (2006).

**Figura 5 – Comparativo entre a distribuição das fibras de aço no CAA e no concreto vibrado, em diferentes planos**



Fonte: MARAGON (2006).

Conforme apresentado na Figura 5, a ausência de vibração no concreto autoadensável favorece a uniformidade de distribuição das fibras em toda a matriz. Já na situação do concreto vibrado, o adensamento mecânico tende a provocar maior dispersão das fibras, exceto no plano perpendicular ao lançamento (plano xz), onde se pode verificar boa uniformidade na distribuição.

O comportamento do CAARFA no estado endurecido quando submetido a esforços de compressão e tração é similar aos dos concretos convencionais fibrosos. Por ter menor teor de agregado graúdo, o módulo de elasticidade tenderia a ser menor que o do concreto convencional fibroso de mesma resistência à compressão, mas essa diferença depende do nível de resistência do concreto e da sua composição, de forma que não é possível fazer uma conclusão generalizada a respeito dessa propriedade. Quando comparadas as resistências à compressão do

CAARFA e do concreto normal, com similar relação água/cimento ou água/materiais em pó, e dependendo do tipo de fíler utilizado, o CAARFA terá uma resistência à compressão ligeiramente superior, devido à melhora na interface entre os agregados, matriz e fibras.

Varias misturas de CAARFA foram produzidas por NEHDI e LADANCHUK (2004) a partir de uma única mistura de CAA de referência, com o propósito de avaliar a fluidez e as propriedades mecânicas dos CAARFA. Foram utilizadas fibras com diferentes geometrias (ondulada e com pontas achatadas) e comprimentos de 30 a 50 mm. Primeiramente foram produzidas misturas com cada tipo de fibra separadamente e em seguida produzidas misturas otimizadas (hibridização) com até quatro tipos diferentes de fibras na mesma mistura, totalizando um volume variando entre 0,5% a 1,0 %. Na avaliação da trabalhabilidade do concreto pelo espalhamento do cone de ABRANS, foi observado que a adição de fibras de aço diminuiu a trabalhabilidade e a fluidez da mistura, mas os valores de espalhamento ficaram dentro da faixa especificada para o CAA com frações volumétricas de fibras de até 1,0 %. Porém, para a combinação de macro fibras de aço (30mm e 50 mm), essa redução da trabalhabilidade foi minimizada. Nos ensaios com a caixa "L", somente três misturas com 0,5% de fibras de aço hibridizadas apresentaram bons resultados de fluidez, estando na faixa de valores aceitáveis para um CAA.

BARROS (2009) em sua dissertação de mestrado produziu concretos autoadensáveis com a incorporação de fibras metálicas baseado em recomendações de TVIKSTA (2000), onde, com a fixação do fator de forma igual a 50, foram propostas 3 dosagens de fibras que fossem tecnicamente praticáveis e implicassem em nenhuma ou pequenas alterações na dosagem de CAA já obtida no estudo de CAVALCANTI (2006), que foi tomada como base para a produção do CAARFA. Foram testadas dosagens de 30 kg/m<sup>3</sup> de fibras de aço que corresponde a uma fração volumétrica de 0,4%, 60 kg/m<sup>3</sup> correspondendo a uma fração volumétrica de 0,8% e 78,5kg/m<sup>3</sup> correspondendo a 1% e uma ligeira alteração na quantidade de aditivo superplastificante, tornando a relação *spc/c* de 0,525% para 0,6%. Observou-se que não houve alterações significativas nas características do CAA com a adição de 30kg/m<sup>3</sup>, com a adição de 60kg/m<sup>3</sup> o diâmetro de espalhamento ficou um pouco abaixo do recomendado para caracterização de CAA

e para a adição de 78,5 kg/m<sup>3</sup> de fibras observou-se uma insuficiência na quantidade de pasta da mistura, forçando além do aumento da quantidade de superplastificante também o aumento de finos na mistura, que após ajustes passou a possuir características de CAA.

Alcântara, LORRAIN e BARBOSA (2004) observaram que, conservando-se a mesma composição da mistura e aumentando-se o teor de fibras, houve uma diminuição nos diâmetros máximos do ensaio de espalhamento. Quanto mais fibras eram adicionadas, maiores diferenças eram verificadas na formação do círculo de espalhamento, passando a superfície, que antes era circular, a apresentar uma forma elíptica. Quando aumentado o teor de fibras, notou-se a tendência de formação de grandes concentrações de fibras no interior da superfície de espalhamento do concreto. Outro fator estudado foi a relação fíler/cimento, variando-a em torno de 0,63. A diminuição da relação fíler/cimento pode implicar em reduções nas condições de escoamento do concreto quando aumentado o teor de fibras da mistura. Conforme se aumentava o teor de fibras, era necessário aumentar a massa do superplastificante com relação à massa de cimento, de forma a se obterem misturas com relativa fluidez. As fibras utilizadas na análise possuíam seção retangular de 1,6mm x 0,03 mm e comprimento de 30 mm, sendo que os teores variaram entre 2kg e 20 kg de fibras para cada metro cúbico de concreto e todas as misturas estudadas apresentaram comportamento reológico de concretos autoadensáveis.

A adição de fibras auxilia na conversão de características frágeis em características dúcteis. O principal papel das fibras é resistir à formação e desenvolvimento das fissuras, por providenciar uma força de ligação entre estas NAAMAN (1992). O desenvolvimento da fissuração em materiais cimentícios é de extrema importância do ponto de vista da durabilidade e das condições de serviço de uma estrutura. Uma importante investigação em termos do número e tamanho das fissuras de materiais cimentícios e convencionais pode ser fundamental para sua utilização, VICTOR *et al.* (1993).

Geralmente os esforços cisalhantes desenvolvidos em estruturas convencionais apresentam valores entre 2 MPa e 5 MPa. Tem sido sugerido por

certos autores que as fibras podem substituir a armadura transversal na sua totalidade, ou em parte, desde que se mantenha a mesma eficiência do compósito em resistir aos esforços de cisalhamento que as armaduras dispostas transversalmente BENTUR E MINDESS (1990).

Segundo BENTUR E MINDESS (1990), com a adição do volume de fibra entre 0,50 % e 1,00 % em misturas de concreto, o ganho de resistência ao cisalhamento em relação ao concreto convencional pode chegar a 30 % no pós-pico. Estudos desenvolvidos por NAAMAN (1992) indicam que as resistências ao cisalhamento dos concretos, utilizando frações volumétricas de fibras maiores que 2 %, podem atingir 38 MPa. Segundo MIRSAYAH e BANTHIA (2002) as fibras são muito efetivas no reforço ao cisalhamento de concretos, aumentando sua resistência em aproximadamente 80 %. Segundo KHALOO E KIM (1997), o ganho de resistência ao cisalhamento aumenta de acordo com o aumento da resistência da matriz. Esses níveis de aumento de resistências são atribuídos à melhora da aderência entre a fibra e a matriz.

## **2.4. Aderência**

A aderência pode ser entendida como sendo a ligação existente entre a barra de aço e o concreto, formando-se assim uma peça única, que trabalha de forma conjunta, evitando os deslocamentos relativos entre os dois materiais e servindo de ponte de transferência de tensões. É a aderência que faz com que dois materiais que possuem resistências diferentes tenham a mesma deformação e trabalhem juntos, fazendo com que os esforços resistidos por uma barra de aço sejam transmitidos para o concreto e vice-versa.

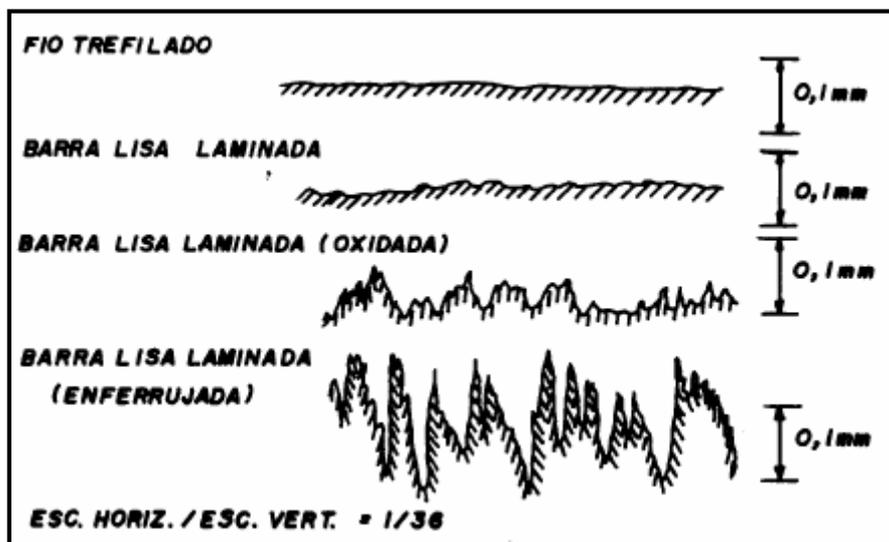
Segundo FUSCO (1975), a aderência pode ser dividida em três tipos, com intenção de facilitar sua análise, entretanto não é possível determinar cada tipo isoladamente, pois a separação em três tipos é meramente esquemática.

### **2.4.1. Tipos de Aderência**

I. Aderência por Adesão: Gerada pela ligação físico-química, que se estabelece na interface aço-concreto durante as reações de pega do cimento. A

aderência depende da limpeza da superfície e da rugosidade das barras, o que não é suficiente para uma boa aderência, pois é perdida no caso de pequenos deslocamentos da barra. A Figura 6 ilustra as condições de rugosidade da barra lisa.

Figura 6 - Acabamento superficial de fios e barras lisas

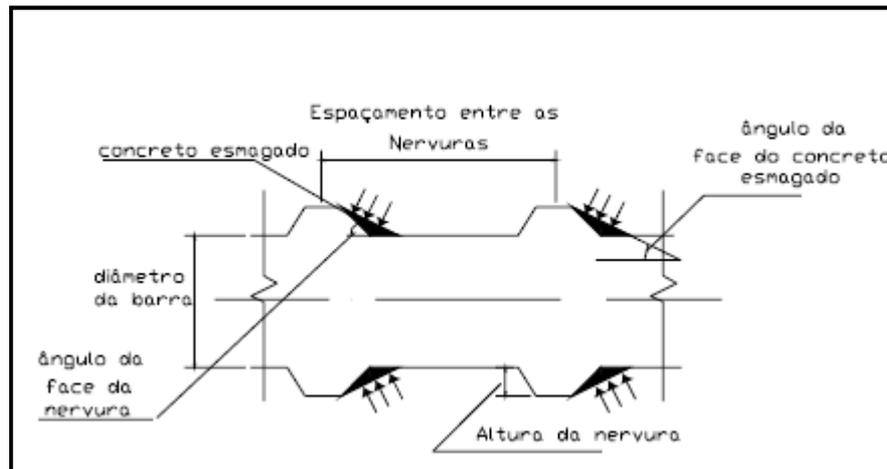


Fonte: FUSCO (1995).

II. Aderência por Atrito: Devida a forças de atrito existentes entre o concreto e o aço, desde que existam pressões transversais às armaduras. A aderência por atrito depende do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, o qual é função do estado superficial da barra.

III. Aderência Mecânica: É a interação mecânica entre o aço e o concreto, decorrente da presença de saliências na superfície da barra (nervuras laminadas, estrias). Este tipo de ligação depende da forma, altura, inclinação das nervuras e da distância entre elas. Através de intertravamento mecânico, do tipo de encaixe entre o concreto e as nervuras da barra de aço, formam-se “consoles de concreto” que são solicitados ao corte e à compressão antes que a barra possa deslizar no concreto, conforme ilustrado na Figura 7, a aderência mecânica é o tipo de ligação mais confiável, pois contribui de maneira fundamental para a solidarização dos dois materiais e possibilita melhor aproveitamentos das resistências mais elevadas do aço.

**Figura 7 – Geometria de uma barra nervurada e a interação mecânica entre a barra e o concreto**



Fonte: TEPFERS (1979)

Segundo FUSCO (1975), o efeito da aderência mecânica também está presente nas barras sem nervuras, chamadas barras lisas, em virtude das irregularidades da superfície inerentes ao processo de laminação. Entretanto, nessas, a aderência mecânica e por atrito se confundem.

De acordo com o mesmo, não é possível determinar cada parcela de aderência isoladamente, e a separação da aderência em três parcelas é simplesmente esquemática, porém seu estudo é fundamental para quantificá-la e, posteriormente, determinar os comprimentos de ancoragem necessários às barras de armadura. Além disso, a aderência do aço ao concreto é fortemente influenciada pela retração, pela deformação lenta e pela fissuração do concreto. Alguns parâmetros que influenciam na aderência serão descritos no tópico a seguir.

#### **2.4.2. Parâmetros que Influenciam na Aderência**

A tensão de aderência pode ser definida como sendo a relação entre a força atuante na barra e a superfície da barra aderente no concreto. Porém, existem vários fatores que podem intervir na sua quantificação e influenciar o comportamento da aderência. Segue abaixo alguns fatores que devem ser levados em consideração. São eles:

I. Composição do Concreto: Como regra geral poderia ser estabelecido que qualquer alteração no traço que não altere a resistência à compressão nem a resistência à tração do concreto, também não alterará seu comportamento na aderência. Entretanto, MARTIN e NOAKOWSKI (1981) afirmam que utilizando agregados de diâmetro maior e pequena quantidade de água se observa um definido acréscimo no comportamento da aderência. Uma explicação para estas observações seria que em misturas com agregados muito finos, as partículas finas e também a água se acumulam nas circunvizinhanças da barra, levando esta região a uma queda na resistência, o que facilita um esmagamento do concreto por compressão junto aos flancos das nervuras, quando a barra for solicitada.

II. Idade de Carga: Considerada por alguns autores como sendo de mesma intensidade que a influência sobre a resistência à compressão ou à tração do concreto.

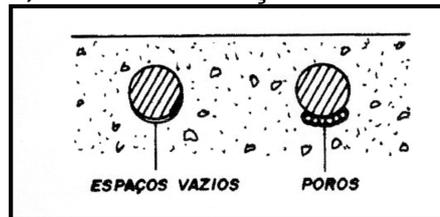
III. Resistência Mecânica do Concreto: Considerada como um dos fatores que influenciam de maneira mais significativa à resistência de aderência. De modo geral, quanto maior a resistência mecânica do concreto, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço - concreto.

IV. Diâmetro da Barra: Segundo SOROUSHIAN e CHOL (1989) e REYNOLDS e BADDY (1982), o aumento do diâmetro da barra reduz a tensão máxima de aderência. Tal fato pode ser explicado devido ao aumento da espessura da zona de transição entre a armadura e o concreto. Além disso, as maiores dimensões das nervuras retêm mais água de amassamento na face inferior da barra, refletindo em uma zona de transição de maior espessura, enfraquecendo assim a ligação entre a matriz de argamassa e a armadura, tornando-se esta mais porosa e ficando vulnerável ao esmagamento do concreto por compressão pelos flancos das nervuras.

V. Posição das Barras na Concretagem: LEONHARDT e MÖNNING (1973) em suas pesquisas observaram que para a qualidade da aderência, a posição da barra (horizontal ou vertical) durante a concretagem é essencial, assim como sua altura em relação ao fundo da forma. Devido à exudação do concreto fresco, há um acúmulo de água sob as barras, que é mais tarde absorvido pelo concreto, deixando vazios os inúmeros poros na parte inferior, Figura 8. A qualidade da aderência em barras horizontais pode, por causa disso, cair à metade dos valores

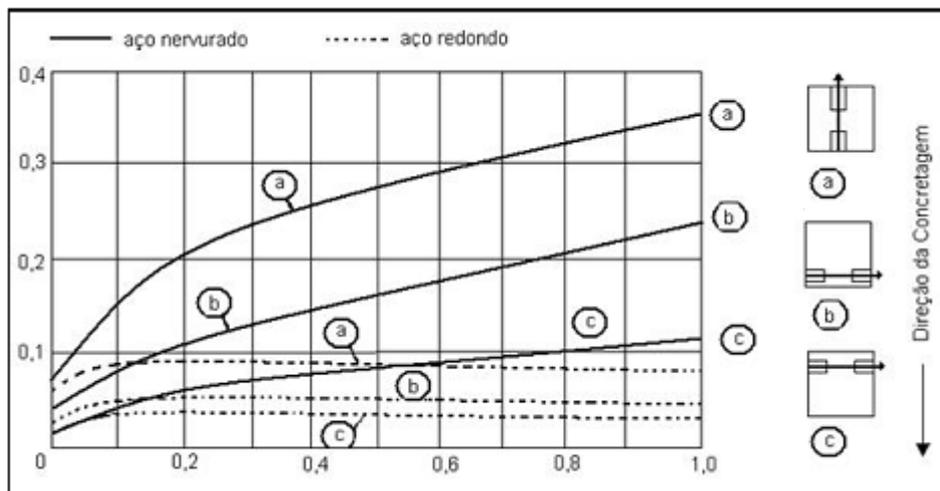
correspondentes às barras verticais. A diminuição depende do fator água-cimento e da altura das barras em relação à forma ou em relação à camada de concreto já endurecido, Figura 9. Em consequência, devem ser levadas e, consideração as grandes diferenças entre os valores de cálculo para o dimensionamento.

**Figura 8 – Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal, devida à exudação e ao acúmulo de água.**



Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1973).

**Figura 9 – Representação esquemática de resultados de ensaio de arrancamento de barras retas em diferentes posições por ocasião da concretagem.**



Fonte: LEONHARDT e MÖNNIG (1973).

VI. Adensamento: Influencia a aderência da mesma maneira que na resistência à compressão.

### 2.4.3. Tipos de Ensaio

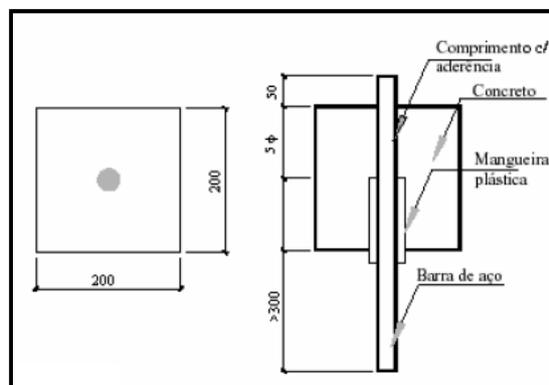
Atualmente, pode-se encontrar na literatura técnica, diferentes tipos de ensaios de caracterização das relações constitutivas entre tensão de aderência e deslizamento da barra dentro da massa de concreto.

De acordo com JAAFAR (2000), muitos destes ensaios, pela forma como foram idealizados, não permitem obter a curva de distribuição real das tensões de aderência ao longo da área de contato da barra com o concreto. O resultado dos ensaios é uma distribuição uniforme de tensões cuja intensidade é obtida dividindo-se a carga aplicada pela área de contato. Dentre esses, podem ser destacados os ensaios de arrancamento, de viga, e das 4 barras, que serão melhor detalhados no tópico seguinte.

#### 2.4.3.1. Ensaio de Arrancamento

O mais tradicional dos ensaios de aderência é o de arrancamento (*pull-out test*), que consiste na extração de uma barra de aço mergulhada em um prisma de concreto, com um comprimento de aderência igual a 5 vezes o diâmetro, como mostrado no esquema da Figura 10. Em uma de suas extremidades é aplicada a carga e na outra são lidos os deslizamentos. Além do trecho da barra sem aderência, pode-se minimizar o atrito entre a placa de apoio e o corpo de prova colocando-se uma borracha entre a placa e o prisma.

**Figura 10 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de arrancamento.**



Fonte: RILEM RC5 (1982).

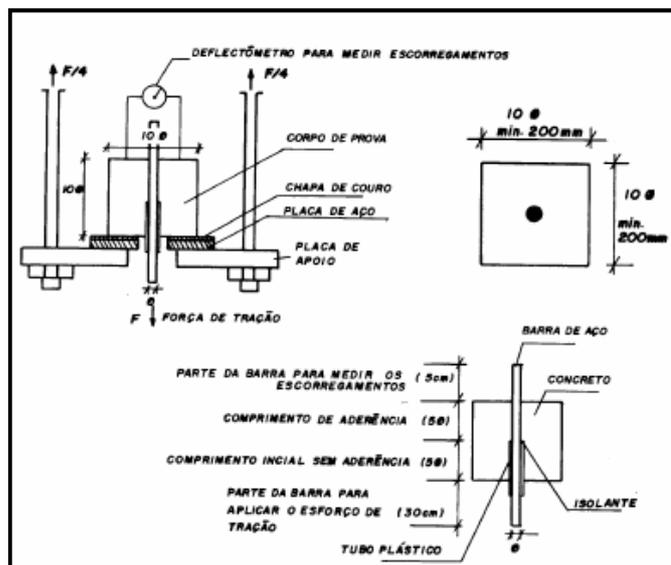
Nota: Dimensões em milímetros.

A validade do ensaio de arrancamento para efeitos de capacidade de ancoragem das barras é questionada, tendo em vista as diferenças existentes entre o panorama de tensões obtido neste tipo de ensaio e o correspondente às regiões de ancoragem das armaduras de peças de concreto armado. No ensaio de arrancamento, surge uma componente de compressão longitudinal. Em zonas de ancoragem de armadura de tração de vigas submetidas à flexão essa componente não existe, FUSCO (1975).

Apesar disso, este ensaio tem sido empregado mundialmente para estudar as variáveis que interferem na aderência, tornando-se um ensaio clássico, regulamentado por normas e organismos internacionais como o RILEM (Recomendação RC 6). Não há restrições quanto a sua utilização, existem na bibliografia técnica relatos de sua aplicação em vários tipos de concretos e barras de diâmetros variados ELIGEHAUSEN (1983), BARBOSA (2003), CATANNEO (2006). As vantagens deste ensaio são a simplicidade do corpo de prova, a execução e a possibilidade de isolar as variáveis influentes na aderência.

Este ensaio de arrancamento direto é normatizado pela RILEM, doc 7.II.128 (1973), com todo detalhamento necessário a sua execução como ensaios de laboratório. Segue abaixo a Figura 11 que mostra a disposição geral deste ensaio de arrancamento.

**Figura 11 – Disposição geral do ensaio de arrancamento proposto pela RILEM (1973).**



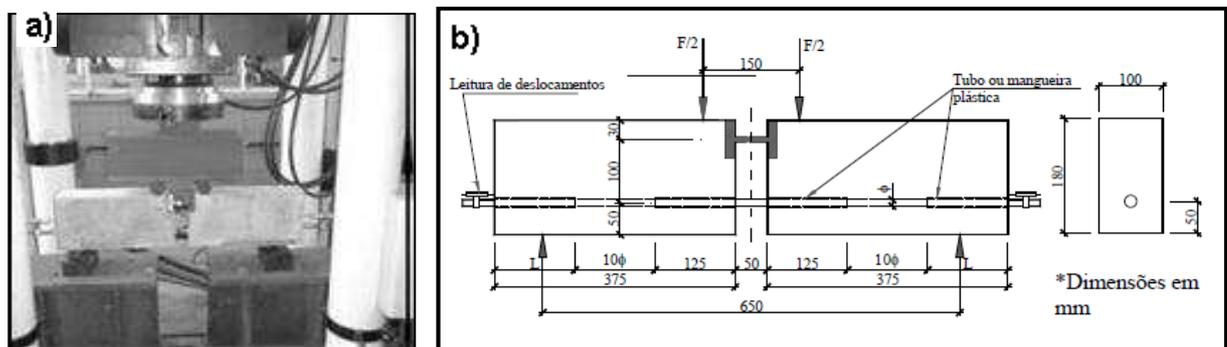
Fonte: RILEM (1973).

Uma variável deste ensaio é o de arrancamento com anel circunferencial (*ring pullout test*). Neste ensaio pode-se medir diretamente a componente de aderência de força de aderência responsável pelo fendilhamento através da instrumentação feita no anel (*strain gage*, por exemplo). Consiste na extração de uma barra de aço concretada no interior de um cilindro de concreto BARBOSA (2001). Vários outros ensaios derivam do ensaio de arrancamento regulamentado pelo RILEM, por exemplo, os ensaios relatados por ROTÁSY (1988), onde a barra é posicionada nos cantos do corpo de prova, com o objetivo de avaliar a influencia do cobrimento na aderência.

#### 2.4.3.2. Ensaio de Viga

O ensaio de viga consiste em dois blocos paralelepípedicos de concreto armado com uma barra de aço na parte inferior, cuja aderência é estudada, e uma rótula na parte superior como mostra a Figura 12 (a) e (b).

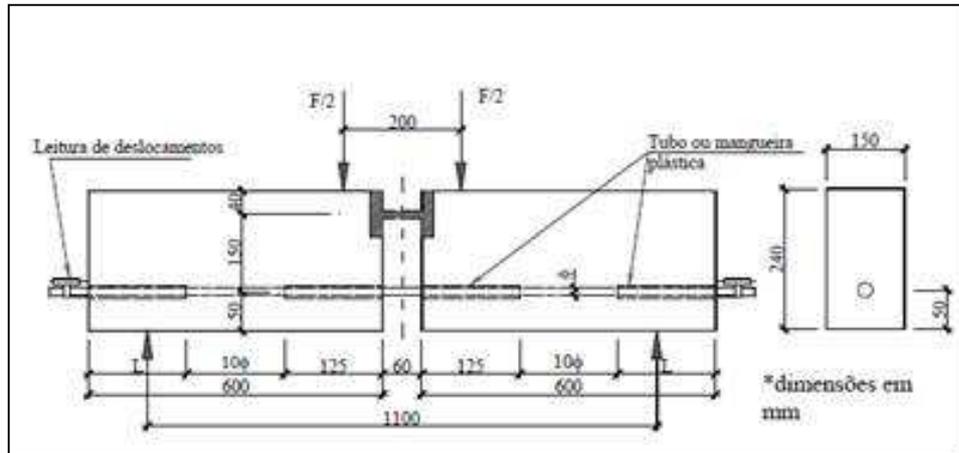
Figura 12 – Ensaio de viga tipo A.



Fonte: RILEM RC 5 (1982).

No tipo (b) são ensaiadas barras com diâmetro variando de 10mm a 16mm, enquanto que no tipo (a) diâmetro entre 16 mm e 32 mm, Figura 13.

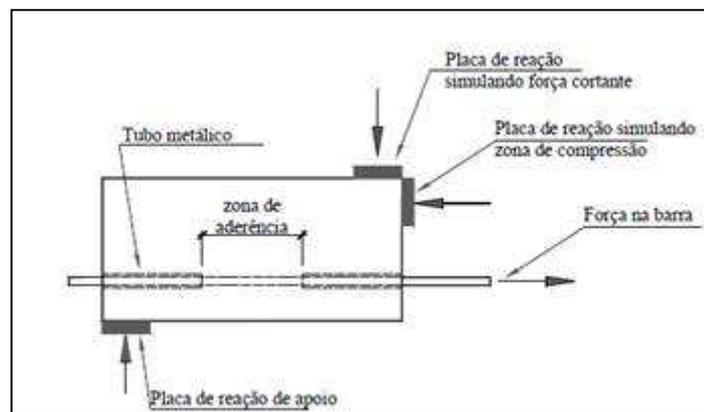
**Figura 13 - Ensaio de viga tipo (b).**



Fonte: RILEM RC5 (1982).

Uma variação deste ensaio é o de extremidade de viga, que consiste em tracionar uma barra posicionada na parte inferior de uma peça prismática. Segundo RIBEIRO (1985) *apud* BARBOSA (2001), ele fornece as mesmas informações que o ensaio de viga, com a vantagem da redução do tamanho do corpo de prova. A Figura 14 mostra detalhe deste tipo de teste.

**Figura 14 – Ensaio de extremidade de viga.**



Fonte: RILEM RC 5 (1982).

Um estudo comparativo entre os resultados obtidos com o ensaio do RILEM e de viga foi feito por SORETZ (1979) *apud* BARBOSA (2001). Após vários testes foi concluído que em termos de tensão média de aderência, há pouca variação dos resultados. A média referida trata-se da média entre os valores das tensões relativas aos deslocamentos 0,01mm, 0,1mm e 1mm, entretanto quando se trata de tensão última, o ensaio de arrancamento geralmente fornece valores superiores aos obtidos pelo ensaio de viga, como pode ser visto pela Tabela 8, na qual a única exceção é para o diâmetro de 8mm.

**Tabela 8 – Valores da tensão de aderência obtidos com o ensaio de arrancamento (A) e de viga (V).**

Diâmetro da Barra (mm)	T <sub>0,01</sub> (MPa)		T <sub>média</sub> (MPa)		T <sub>ruptura</sub> (MPa)	
	A	V	A	V	A	V
8,0	2,86	4,32	7,01	7,92	16,60	16,80
10,0	3,75	6,60	7,13	10,00	17,40	14,96
16,0	3,53	4,67	7,70	7,67	17,77	14,86
25,0	2,15	3,23	4,39	4,97	13,17	8,78
30,0	2,91	3,86	7,00	5,90	17,10	11,50

Fonte: BARBOSA (2001).

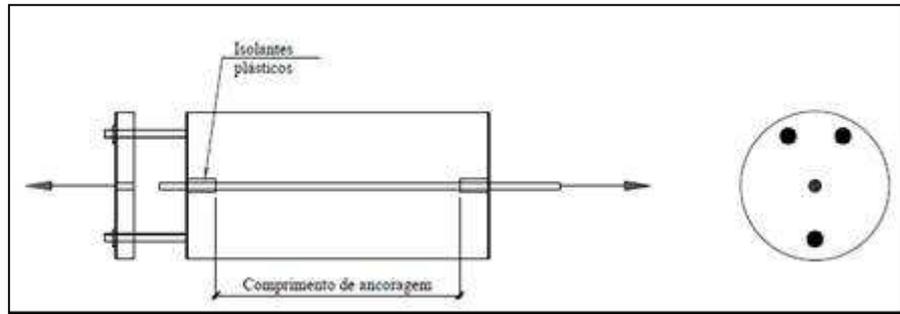
Resultados semelhantes obtidos por SORETZ (1979) são relatados pelo Boletim CEB 118 (1979) para concretos de resistência a compressão de 30 MPa.

Segundo FERGUSSON (1965) *apud* BARBOSA (2001) a fissuração presente nos corpos de prova de viga induz a menores carregamentos e deslizamentos provocando esta diferença entre os valores de tensão última de aderência, obtidos com os dois tipos de ensaios.

#### **2.4.3.3. Ensaio das 4 Barras**

FUSCO (1994) mostra ensaios desenvolvidos na Universidade de São Paulo para estudo da ancoragem em condições de emenda. Como pode ser visto na Figura 15, uma barra embutida no centro de um corpo de prova cilíndrico é tracionado em uma extremidade enquanto na outra encontram-se três barras dispostas segundo os vértices de um triângulo.

Figura 15 - Esquema geral de ensaio desenvolvido na USP.

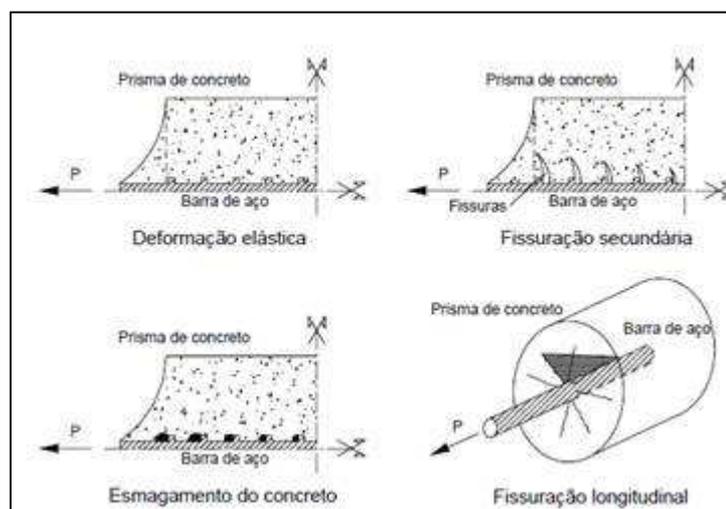


Fonte: FUSCO (1994).

#### 2.4.4. Mecanismos de Ruptura

De acordo com ROTZ (1989), existem quatro tipos de mecanismos distintos para o fenômeno da aderência, sendo eles: a deformação elástica, a fissuração secundária, a fissuração por fendilhamento longitudinal, e o esmagamento do concreto nas nervuras da barra de aço. A Figura 16 ilustra esses mecanismos.

Figura 16 – Etapas do comportamento de ruptura da aderência.



Fonte: ROTZ (1989).

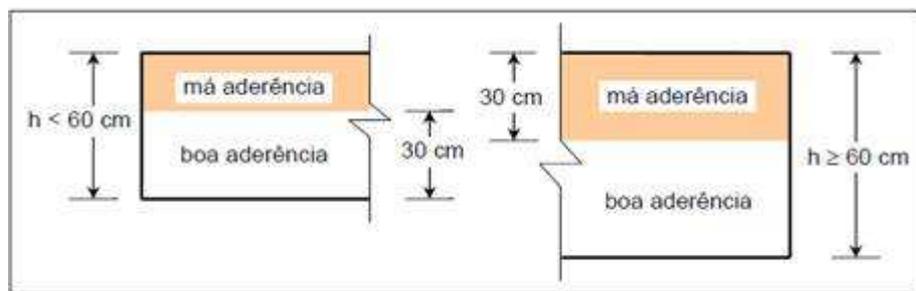
Segundo FERGUSON (1979), quando o escorregamento da barra atinge toda a extensão do comprimento de ancoragem, podem ocorrer, em ensaios de arrancamento, três tipos de ruptura: o fendilhamento longitudinal do concreto, o arrancamento da barra, no caso de pequenos diâmetros ou utilizar concreto leve, e o escoamento da barra, caso o comprimento de ancoragem seja suficiente.

#### 2.4.5. Regiões Favoráveis ou Desfavoráveis Quanto à Aderência

As condições de boa ou má aderência das barras estão definidas no item 9.3.1 da ABNT NBR 6118 (2003) que considera uma boa situação quanto à aderência os trechos das barras que esteja em uma das posições seguintes:

- I. Com inclinação maior que  $45^\circ$  sobre a horizontal;
- II. Horizontais ou com inclinação menor que  $45^\circ$  sobre a horizontal, desde que:
  - ✓ Para elementos estruturais com  $h < 60$  cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
  - ✓ Para elementos estruturais com  $h \geq 60$  cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima, Figura 17.

**Figura 17 – Situações de boa e má aderência segundo a NBR 6118:2003.**



Fonte: ABNT (2003).

Os trechos situados em outras posições, e quando forem utilizadas fôrmas deslizantes, devem ser consideradas em má situação quanto à aderência.

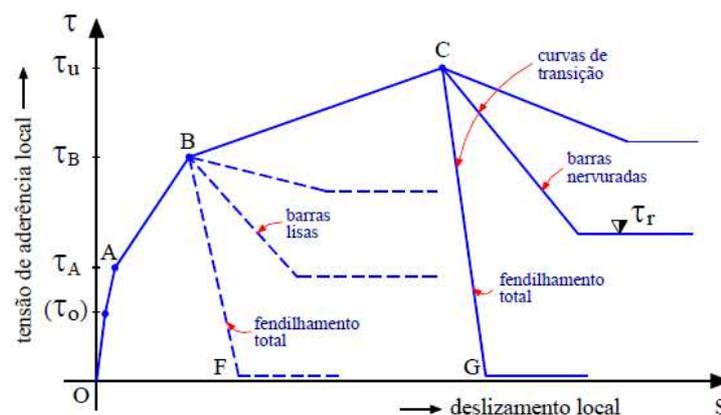
Em relação à situação II anterior, é pertinente um comentário. Se o elemento de concreto tiver altura maior que 60 cm, mas for concretado em trechos (camadas)

de no máximo 30 cm de altura, faz-se o adensamento de cada camada e espera-se até que o concreto atinja consistência tal que, ao colocar nova camada, não haja fuga de nata de concreto de uma camada para outra. Com esses cuidados de execução, pode-se dizer que todas as armaduras da peça estão em uma região de boa aderência.

#### 2.4.6. Modelos para o Comportamento da Aderência

O comportamento da aderência pode ser explicado por diversos modelos da literatura. Entre esses, o proposto por TASSIOS (1979), apresenta vários estágios do desenvolvimento de tensões com seus respectivos deslocamentos, segundo a Figura 18.

**Figura 18 – Curva teórica tensão de aderência-deslizamento.**



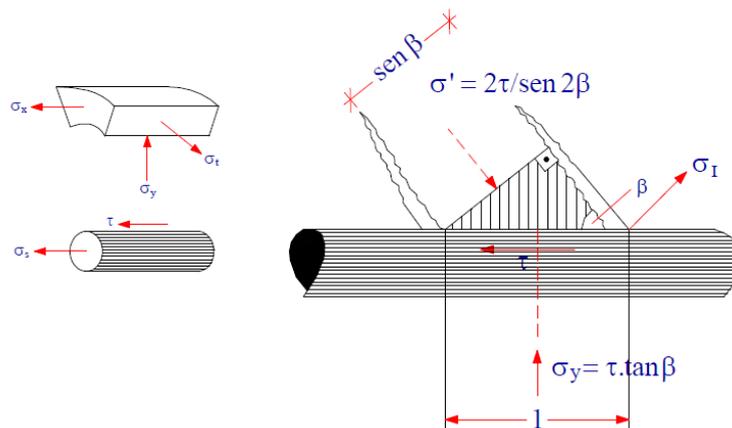
Fonte: TASSIOS (1979).

Antes da tensão de aderência química ( $\tau_0$ ) ser atingida, ocorrem deslizamentos extremamente pequenos, da ordem de poucos microns ( $\mu$ ). Com o aumento do carregamento, ocorre ruptura da adesão, caracterizada pelo nível de tensão ( $\tau_0$ ) e a posterior mobilização do engrenamento mecânico tanto entre a pasta de cimento e as irregularidades microscópicas da superfície da armadura, no caso de barras lisas, como entre o concreto e as nervuras, no caso de barras nervuradas. Após a tensão ( $\tau_A$ ), surgem as primeiras fissuras internas (transversais e diagonais),

devido às tensões de tração devido à força de arrancamento ultrapassarem a resistência à tração do concreto. A partir deste ponto, a rigidez do concreto é reduzida, caracterizada por uma inclinação menor da curva.

Após a primeira fissuração interna, a distribuição da tensão ao longo da interface depende das distribuições de carregamento e de contorno. As tensões radiais de compressão  $\sigma_y$  e as longitudinais de tração  $\sigma_x$  surgem pela tentativa de arrancamento da barra. Devido à ação combinada de  $\tau$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$ , mais as possíveis tensões longitudinais e radiais externas, como a pressão de retração, são produzidas grandes tensões diagonais de tração  $\sigma_I$ , que causam as fissuras diagonais transversais ao longo da amadura indicadas na Figura 19.

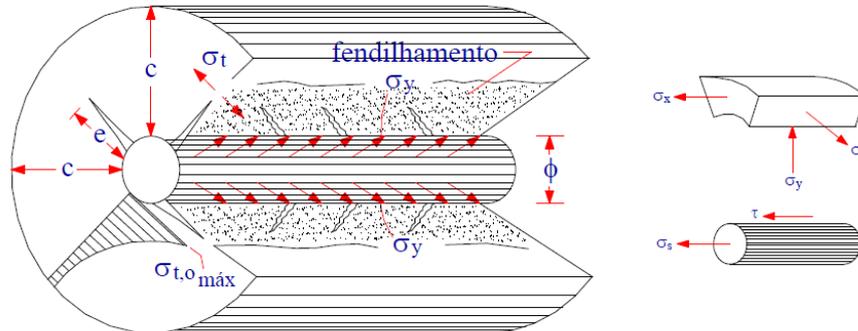
**Figura 19 – Tensões entre fissuras transversais consecutivas**



Fonte: TASSIOS (1979).

Simultaneamente ou logo após a fissuração transversal, as tensões de compressão  $\sigma_y$  também originam as tensões de tração circunferenciais  $\sigma_t$ , que produzem as fissuras por micro-fendilhamento interno, como ilustra a Figura 20. Entretanto, geralmente os valores de  $\sigma_t$  são menores que o de  $\sigma_I$  para esse estágio de carregamento, fazendo a fissuração transversal anteceder micro-fendilhamento.

**Figura 20 – Fissuras transversais e de fendilhamento.**

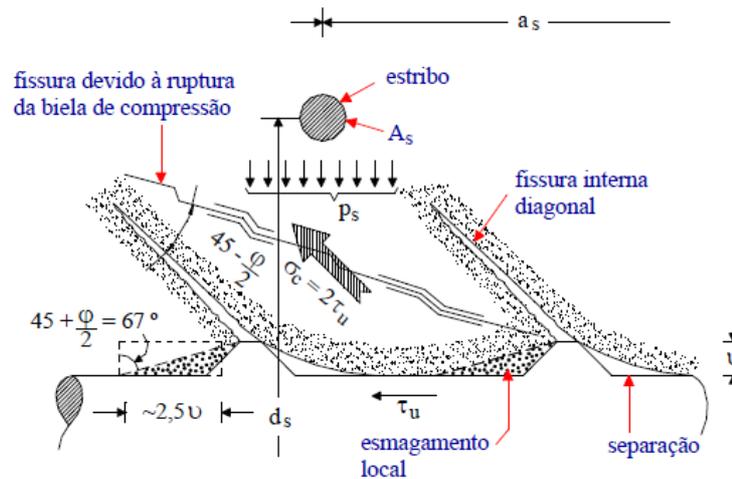


Fonte: TASSIOS (1979).

No trecho AB da Figura 18, ocorre a perda parcial do engrenamento e é introduzida então, uma componente de atrito para contribuir com a aderência. À medida que o carregamento continua crescendo as fissuras de fendilhamento se propagam radialmente e longitudinalmente, até a tensão  $\tau_B$  ser alcançada. A partir deste nível, as barras lisas são perfeitamente arrancadas, deixando um orifício quase intacto, enquanto no caso de barras nervuradas, o concreto rompe por fendilhamento quando não há confinamento suficiente (ramo BF na curva).

A possível ruptura da aderência para barras nervuradas com ação do confinamento pode ser ilustrada pela Figura 21, onde se considera que o principal mecanismo remanescente de aderência seja devido ao engrenamento entre as nervuras, combinado com uma considerável destruição do concreto envolvente. O “dente” de concreto existente entre as fissuras transversais consecutivas está sob a ação de uma tensão de compressão  $\sigma_c$  igual a  $2\tau_u$ , de uma pequena parcela de confinamento, reduzida devido à degradação do concreto circundante e de uma diminuição na região de atuação das tensões cisalhantes. A degradação total da ligação é ocasionada pela ruptura dessas bielas de compressão.

**Figura 21 – Possível estágio de ruptura da aderência para concreto confinado e barra nervurada.**

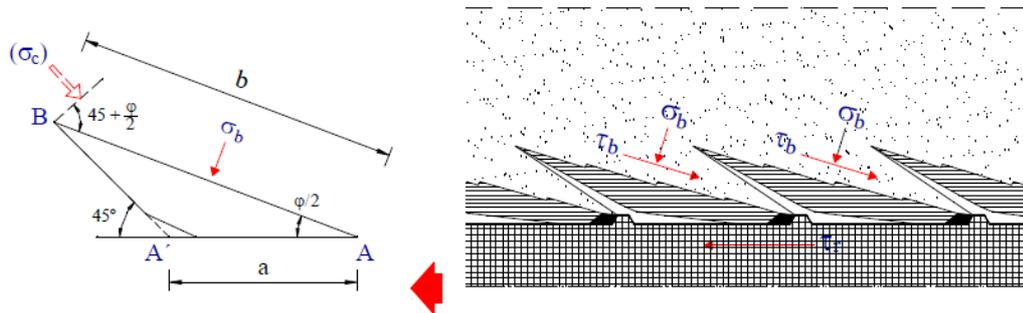


Fonte: TASSIOS (1979).

Após este estágio, para barras nervuradas, o único mecanismo de aderência restante é o atrito, que também contribuía anteriormente. Sob as condições de ensaio de deformação controlada, pode-se capturar o comportamento de aderência após a ruptura. Após o pico do diagrama (ponto C) da Figura 19, ocorre um decréscimo brusco da curva até certo valor, que caracteriza a resistência residual de aderência  $\tau_r$ . Contudo, quando o fendilhamento se desenvolve ao longo de todo o cobrimento, a tensão de aderência residual é quase nula.

A tentativa de identificar este patamar de tensão residual, quando o fendilhamento não é generalizado devido à presença de armadura transversal mínima, é feita na Figura 22. O dente de concreto de forma quase triangular apresenta a tendência de movimento junto com a barra. O principal mecanismo de oposição a este movimento ocorre devido ao engrenamento concreto-concreto ao longo a fissura AB (ruptura das bielas de compressão).

**Figura 22 – Hipótese do mecanismo da resistência de aderência residual XX.**



Fonte: TASSIOS (1979).

#### 2.4.7. Cálculo da Tensão de Aderência

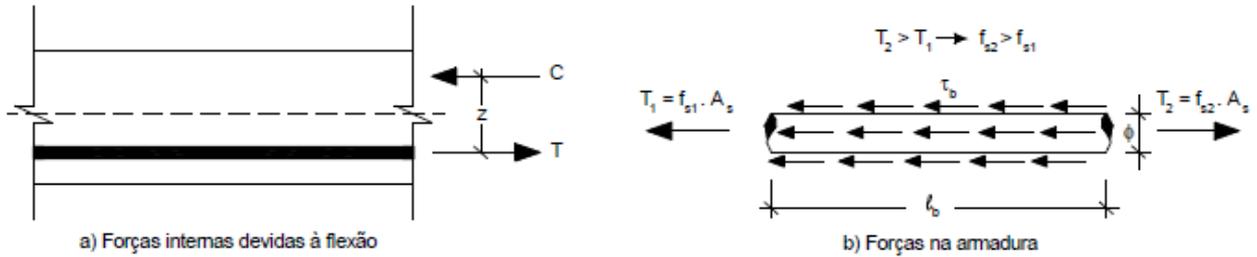
##### ➤ Equação Diferencial da Aderência

O princípio básico do concreto armado é que o aço resista à tração enquanto o concreto resiste à compressão. Para isso, é necessário que haja uma transferência de esforços de um para o outro, o que é possível devido à aderência. Nas peças de concreto armado, as armaduras sofrem variação de tensão ao longo do comprimento, especialmente nas zonas de ancoragem e de variação do momento fletor.

Para que não haja o escorregamento da armadura e a peça permaneça em equilíbrio, é necessário que surjam as tensões de aderência. A Figura 23 ilustra esse comportamento.

Para que a armadura não escorregue, é necessário que apareça uma força de aderência ( $F_{ader}$ ) que equilibre a diferença ( $T_2 - T_1$ ). Montando-se a equação de equilíbrio para as forças horizontais, tem-se que:

Figura 23 – Surgimento da tensão de aderência.



Fonte: Dumêl & Libânio (2007).

$$T_2 = T_1 + F_{ader} \quad F_{ader} = \tau_b \times Al_{at}$$

$$f_{s1} \times A_s + \tau_b \times \pi \times \phi \times \ell_b \quad A_s = \frac{\pi \phi^2}{4}$$

$$Al_{at} = \pi \times \phi \times \ell_b f_{s2} \times A_s =$$

$$\Delta f_s = f_{s2} - f_{s1} = \frac{4 \times \pi \times \phi \times \ell_b \times \tau_b}{\pi \phi^2} = \frac{4 \times \ell_b \times \tau_b}{\phi}, \text{ ou}$$

$$\tau_b = \frac{\Delta f_s \times \phi}{4 \times \ell_b}$$

Assim,

$$\frac{\Delta f_s}{\ell_b} = \frac{4 \times \tau_b}{\phi}$$

Eq. 1

Onde:

T = Forças de tração;

C = forças de compressão;

z = braço de alavanca interno;

fs = tensão na armadura;

As = área da seção transversal da armadura;

$\tau_b$  = tensão de aderência;

Alat = área de atuação de  $\tau_b$ ;

$\phi$  = diâmetro da barra (armadura).

Se o elemento for de comprimento infinitesimal  $dx$ , pode-se reescrever a Equação 1 da seguinte forma:

Eq. 2

$$\frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{4 \times \tau b}{\phi}$$

Logo, se a armadura estiver sob tensão constante ( $\Delta f_s = 0$ ), a peça já se encontra em equilíbrio, não havendo necessidade da atuação da força de aderência. Porém, sempre que haja a variação de tensão ( $\Delta f_s \neq 0$ ), precisa-se da força de aderência para que a armadura não escorregue em relação ao concreto, o equilíbrio seja mantido, e possa ser feita a transferência dos esforços.

O deslizamento  $s(x)$  será a diferença entre os deslizamentos do aço e do concreto:

$$s(x) = s_s - s_c$$

Eq. 3

Entretanto, a derivada dos deslizamentos em relação a  $x$  é a deformação específica. Assim:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \varepsilon_s - \varepsilon_c$$

Eq. 4

Onde,  $\varepsilon_c$  e  $\varepsilon_s$  são as deformações no concreto e no aço respectivamente. No regime elástico, de acordo com a Lei de Hook, pode-se escrever:

$$\sigma_c = E_c \times \varepsilon_c$$

Eq. 5

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s$$

Eq. 6

Desta Forma:

$$\frac{ds(x)}{dx} = \frac{\sigma s}{E_s} - \frac{\sigma c}{E_c}$$

Eq. 7

Onde  $E_c$  e  $E_s$  são os módulos de elasticidade do concreto e do aço.

Derivando a equação 7 em relação a  $x$  teremos:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} = \frac{d\sigma s}{E_s dx} - \frac{d\sigma c}{E_c dx}$$

Eq. 8

Substituindo a equação 2 na 8 obtem-se:

$$\frac{d^2s(x)}{dx^2} - \frac{4\tau}{E_s \emptyset} = - \frac{d\epsilon c}{E_c dx}$$

Eq. 9

A equação diferencial 9 pode ser solucionada com condições de contorno adequadas e com leis constitutivas para o aço e o concreto. Necessita ainda de uma função  $\tau(x)$ , que relacione tensão de aderência e deslizamentos.

➤ Aderência segundo a ABNT NBR 6118 (2003)

A ABNT NBR 6118:2003 (ABNT, 2003) em seu item 9.3.2 apresenta uma expressão que fornece o valor da resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto na ancoragem de armaduras passivas. Nesta expressão, são levados em consideração a presença ou não de nervuras na barra de aço, a bitola

da barra e sua posição em situação de boa ou má aderência, como apresentada na Equação 10.

$$F_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot F_{ctd}$$

Eq. 10

Onde,

$F_{bd}$  = Resistência de aderência de cálculo da armadura passiva

$$F_{ctd} = F_{ctk,inf} / \gamma_c$$

$$F_{ctk,inf} = 0,7 \cdot F_{ct,m}$$

$$F_{ct,m} = 0,3 \cdot F_{ck}^{2/3}$$

$F_{ck}$  = Resistência característica à compressão do concreto (MPa);

$\eta_1 = 1,0$  para barras lisas;

$\eta_1 = 1,4$  para barras entalhadas;

$\eta_1 = 2,25$  para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1,0$  para situação de boa aderência;

$\eta_2 = 0,7$  para situação de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$  para  $\Phi < 32$  mm;

$\eta_3 = (132 - \Phi) / 100$ , para  $\Phi \geq 32$  mm;

## 2.4.8. Modelagem da Curva Tensão de Aderência x Deslizamento

### 2.4.8.1. Modelo Proposto por BARBOSA (2001)

A autora propõe um modelo baseado em análise estatística de dados experimentais. Foram realizados 140 ensaios do tipo arrancamento (*pull-out*), e foram tomadas como variáveis a resistência à compressão e o diâmetro das barras e os concretos utilizados foram o concreto convencional e o concreto de alto desempenho (CAD). Após a análise dos resultados são apresentados 2 equações:

$$\text{para } f_c \leq 50 \text{ MPa} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\tau = 19,36 \times \delta^{0.51}$$

$$\text{com, } \delta_{max} = 0.25 \times \phi^{0.68}$$

Eq. 12

$$\tau = 32,58 \times \delta^{0.48} \quad \text{para } f_c > 50 = \text{MPa}$$

Eq. 13

$$\text{Com, } \delta_{max} = 0,52 \times \phi^{0.42}$$

Eq. 14

Onde:

$\tau$  = Tensão de aderência em MPa;

$\delta$  = Deslizamento em mm;

$\phi$  = Diâmetro da barra;

$f_c$  = Resistência a compressão do concreto;

Além disto, BARBOSA (2001) apresentou as Equações para o cálculo da tensão máxima, baseadas em análises estatísticas de dados experimentais:

Para concretos com resistência à compressão menor ou igual a 50 MPa

$$\tau_m = e^{0,082\phi} + e^{0,019f_c} + 0,86 \quad \text{Eq. 15}$$

$$\tau_{max} = e^{0,104\emptyset} + e^{0,027f_c} + 0,93$$

Eq. 16

Para concretos com resistência à compressão > 50MPa

$$\tau_m = e^{0,05\emptyset} + e^{0,004f_c} + 4,35$$

Eq. 17

$$\tau_{max} = e^{0,08\emptyset} + e^{0,00f_c} + 6,$$

Eq. 18

Onde:

$\tau_m$  é a tensão média em MPa obtida para os deslizamentos de 0,01, 0,1 e 1mm;

$\tau_{max}$  é a tensão máxima de aderência em MPa;

$\emptyset$  é o diâmetro da barra em milímetros;

$f_c$  é a resistência a compressão do concreto em MPa;

### 2.4.8.2. Modelo Proposto por ALMEIDA FILHO (2006)

ALMEIDA FILHO (2006) apresenta expressões baseadas em análises de dados de ensaios de arrancamento de corpos de prova em concreto autoadensável, concreto convencional e CAD, foram tomadas como variáveis a resistência à compressão e o diâmetro das barras, foi utilizado uma hipótese simplificadora que considera a superfície da barra lisa e sem nervuras. Os modelos apresentados foram obtidos através de regressões exponenciais.

Para concretos com resistência em torno de 30MPa são propostas as expressões a seguir:

$$\tau(\delta) = 11,522 - 10,138 \times e^{(-\delta/0,2552)} \quad \text{para } \phi=10\text{mm} \quad \text{Eq. 19}$$

$$\tau(\delta) = 10,583 - 9,165 \times e^{(-\delta/0,3597)} \quad \text{para } \phi=16\text{mm} \quad \text{Eq. 20}$$

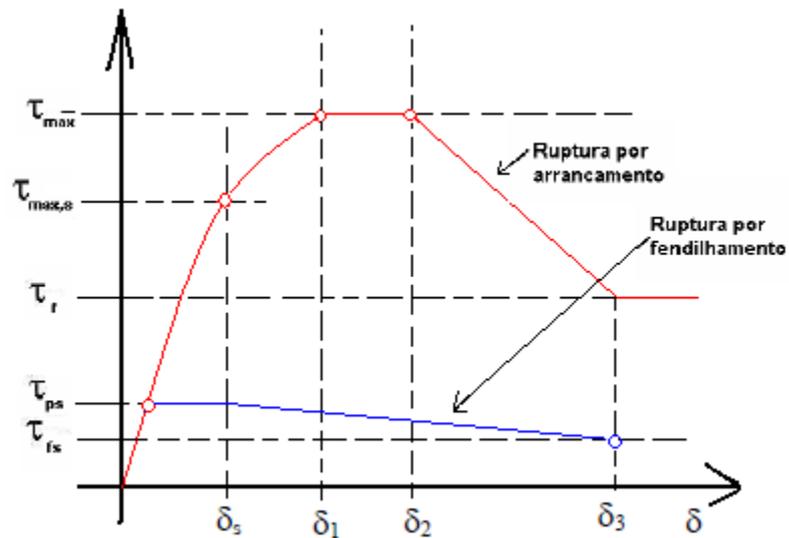
Onde:

$\tau(\delta)$  = Tensão de aderência, em MPa;  
 $\delta$  = Deslocamento, em mm;

### 2.4.8.3. Modelo para Concreto com Fibras

HARAJLI (1995) propôs um modelo para concreto com fibras baseado nos trabalhos de ELIGEHAUSEN *et al.* (1983) composto de duas formulações: uma para ruptura por arrancamento e outra para ruptura por fendilhamento, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Modelo de HARAJLI (1995) para curva tensão de aderência x deslizamento.



Fonte: HARAJLI (1995).

Através da combinação dos resultados obtidos por HARAJLI (1995) e por ELIGEHAUSEN (1983), foi proposta a relação entre deslizamento máximo ( $\delta_{max}$ ) e a distância entre as nervuras ( $s_r$ ):

$$\delta_{max} = 0,189 \times s_r + 0,18 \text{ (em mm)} \quad \text{Eq. 21}$$

Ou de forma mais prática:

$$\delta_{max} = s_r / 5 \quad \text{Eq. 22}$$

No caso de ruptura por arrancamento, a curva é dividida em quatro estágios, conforme Figura 25:

$$\tau = \tau_{max} \left( \frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^\alpha \quad \text{para } 0 \leq \delta \leq \delta_1 \quad \text{Eq. 23}$$

$$\tau = \tau_{max} \quad \text{para } \delta_1 \leq \delta \leq \delta_2 \quad \text{Eq. 24}$$

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_f) \times [(\delta - \delta_2) / (\delta_3 - \delta_2)] \quad \text{para } \delta_2 \leq \delta \leq \delta_3 \quad \text{Eq. 25}$$

$$\tau = \tau_f \quad \text{para } \delta > \delta_3 \quad \text{Eq. 26}$$

De acordo com HARAJLI (1995), os resultados experimentais mostraram que os parâmetros ideais para as curvas das equações 23 a 26, quando aplicadas às barras de 8 mm a 30 mm de diâmetros são:

$$\alpha = 0,30$$

$$\tau_{max} = 2,5 \times f_c^{0,5}$$

$$\tau_f = 0,9 \times f_c^{0,5}$$

$$\delta_1 = 0,75 \times \delta_{max} = 0,15 \times S_r$$

$$\delta_2 = 1,75 \times \delta_{max} = 0,35 \times S_r$$

$$\delta_3 = S_r$$

As formulações apresentadas não levam em consideração o percentual de fibra empregado no concreto. O autor justifica que a influencia das fibras na relação tensão de aderência versus deslizamento será levada em consideração na resistência à compressão.

A ruptura por fendilhamento é modelada por uma expressão para a tensão  $\tau_{max,s}$ , correspondente ao inicio do fendilhamento, e outra para a tensão de pós-fendilhamento  $\tau_{ps}$ . Considerando que a tensão de tração do concreto seja uniformemente distribuída sobre a superfície fissurada, têm-se:

$$\tau_{max,s} = \frac{\sigma_{sc} \times A_c}{\pi \times d_b \times \ell_b}$$

Eq. 27

$$\tau_{p,s} = \frac{\sigma_{ps} \times A_c}{\pi \times d_b \times \ell_b}$$

Eq. 28

Onde:

-  $\sigma_{sc}, \sigma_{ps}$  tensão de tração do concreto reforçado com fibras no instante do fendilhamento e logo após, respectivamente.

As equações 23 e 24 podem ser expressas em função da relação entre o cobrimento  $c$  e do diâmetro da barra  $\emptyset$ .

Eq. 29

$$\tau_{max,s} = \frac{2 \times \sigma_s}{\pi} \left( \frac{c}{\emptyset} \right)$$

$$\tau_{p,s} = \frac{2 \times \sigma_{ps}}{\pi} \left( \frac{c}{\emptyset} \right)$$

Eq. 30

O modelo tem como hipótese que, para os percentuais comumente empregados (menos de 3%), a contribuição das fibras na tensão de tração ocorre apenas após a abertura das fissuras, ou seja, após o fendilhamento. Expressando então a tensão de tração em função da resistência à compressão, resulta para a tensão máxima:

$$\tau_{max,s} = \alpha \left( \frac{c}{\emptyset} \right) \sqrt{f_c} \leq 2,5 \sqrt{f_c}$$

Eq. 31

Onde  $\alpha$  é um parâmetro de resistência determinado experimentalmente e relativo à distribuição das tensões de tração do concreto antes do fendilhamento. O

deslocamento relativo ao fendilhamento é determinado através da Equação 23 substituindo  $\tau$  por  $\tau_s$ :

$$\delta_s = \delta_1^{(1/\alpha)} \text{Ln}(\tau_s / \tau_1)$$

(Eq. 32)

Considerando que a tensão de tração de pós-fissuração do concreto ( $\sigma_{ps}$ ) dependa do índice de reforço da fibra ( $V_f L/d_f$ ) e da tensão de aderência última da fibra, pode-se escrever:

$$\sigma_{ps} = k \tau_u \times V_f \times L/d_f$$

Eq. 33

Onde  $k$  é uma constante que leva em consideração a orientação, características de aderência e distribuição das fibras. Assumindo que a tensão de aderência da fibra é proporcional a resistência a compressão, e substituindo a Equação 33 na Equação 30, obtém-se:

$$\tau_{ps} = \beta \sigma_c \times \sqrt{f} \times V_f \times L/d_f \times \left(\frac{c}{\phi}\right) \leq \sigma_s$$

Eq. 34

Onde  $\beta$  é um parâmetro obtido experimentalmente e representa a orientação e as características de aderência e distribuição das fibras.

O índice de reforço da fibra e a relação  $c/\Phi$  também influenciam a parcela da aderência referente ao atrito ( $\tau_{fs}$ ). Entretanto é mais conveniente expressar  $\tau_{fs}$  como uma parcela da tensão de pós-fendilhamento:

$$\tau_{fs} = \gamma \sigma_c \times \tau_{ps} \leq 0,35 \times \tau_1$$

Eq. 35

## Capítulo 3: Programa Experimental

### 3.1. Introdução

De forma a alcançar o objetivo principal deste trabalho, que é a análise comparativa do comportamento do ensaio de arrancamento (*pull out test*) proposto para três diferentes concretos, através de curvas gráficas, este capítulo trás discriminada as etapas que antecederam a moldagem dos corpos de prova, que vão desde a determinação das propriedades dos materiais utilizados, passando pela produção das formas e dos concretos. Além disso, são apresentados os métodos de ensaio utilizados para a caracterização das propriedades no estado fresco e endurecido.

Este trabalho utilizou as dosagens dos CAAs desenvolvidas nos estudos de CAVALCANTI (2006) e BARROS (2009), bem como os materiais empregados em suas pesquisas. Toda etapa experimental foi realizada no Laboratório de Estruturas e Materiais (LEMA) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

Foram confeccionados corpos de prova para os ensaios de compressão axial, módulo de elasticidade e ensaio de arrancamento, os procedimentos seguidos para a realização dos ensaios bem como as quantidades de corpos de prova produzidos seguiram respectivamente as normas ABNT NBR 5739 (1994), ABNT NBR 8522 (2008) e as recomendações da RILEM-CEB-FIP (1973).

### 3.2. Materiais

Os materiais empregados para a produção dos concretos usados neste trabalho foram cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, resíduo do corte do mármore e do granito, superplastificante, fibras metálicas e água, como foi mencionado são os mesmos utilizados em trabalhos prévios.

O cimento utilizado foi do tipo Portland composto CP II-Z 32 de um mesmo lote de fabricação, com características físicas e químicas de acordo com a ABNT

NBR 11578 (1997) – *Cimento Portland Composto*, e com massa específica de 3150 kg/m<sup>3</sup>.

O agregado graúdo utilizado foi a pedra britada de origem granítica com dimensão máxima de 12,5mm, popularmente conhecida como brita 1.

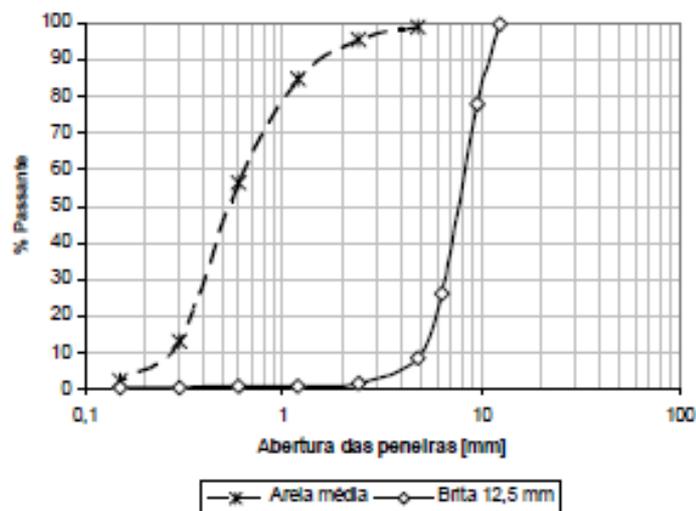
O agregado miúdo foi a areia classificada como areia média, conforme a ABNT NBR 7211 (2005) – *Agregado para Concreto*, cuja dimensão máxima característica é de 2,4mm. Na Tabela 9 são apresentadas as características da brita e da areia utilizadas e na Figura 25 são apresentadas suas respectivas curvas granulométricas.

**Tabela 9 – Caracterização dos agregados**

Caracterização	Pedra Britada 12,5mm	Areia Média
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,650	2,611
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,381	1,449
Massa unitária no estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	1,456	-
Módulo de finura	-	2,492
Absorção (%)	0,82	0,60

Fonte: BARROS (2009).

**Figura 25 - Curva granulométrica dos agregados.**



Fonte: BARROS (2009).

A adição mineral utilizada foi o resíduo do corte do mármore e do granito (RCMG) proveniente de uma fabrica de desdobramento de pedras ornamentais localizada na cidade de Maceió, após ser peneirado em peneira de abertura de 300  $\mu\text{m}$ , como mostra a Figura 26. O RCMG é considerado uma adição predominantemente inerte, contribuindo para uma maior compacidade da estrutura interna do material cimentício, principalmente por ação física, conhecida como efeito fíler.

**Figura 26 – Resíduo do corte do mármore e do granito, passante na peneira de abertura de 300  $\mu\text{m}$ .**



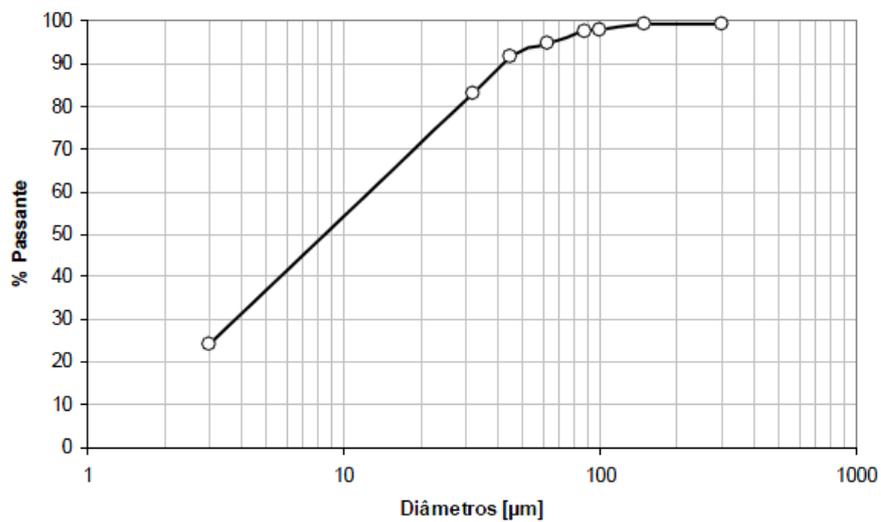
Fonte: AUTORA (2011).

Através de análises feitas por granulometria à laser no Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas, foi possível avaliar a composição granulométrica do RCMG. Na Tabela 12 é apresentada a caracterização do RCMG e na Figura 27 é mostrada a curva granulométrica do resíduo.

**Tabela 10 – Caracterização do RCMG**

Propriedade	RCMG # 300 $\mu\text{m}$
Tipo	Inerte
Massa Específica Real (método do picnômetro)	2,685 g/cm <sup>3</sup>
Superfície Específica (método de Blaine)	208,5 m <sup>2</sup> /kg
Material retido na peneira de #300	0,558%
Granulometria à laser	% Passante ( $\mu\text{m}$ )
3	24,08
32	82,97
45	91,77
63	94,78
88	97,56
100	98,06
150	99,15

Fonte: CAVALVANTI (2006).

**Figura 27 – Curva granulométrica do RCMG.**

Fonte: CAVALVANTI (2006).

O superplastificante utilizado foi de terceira geração, a base de éter carboxílico modificado, a Tabela 13 abaixo apresenta as principais propriedades deste produto.

**Tabela 11– Propriedades do superplastificante utilizado no CAA**

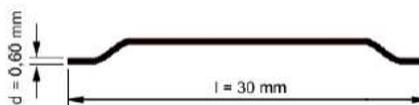
Nome	Tipo	pH	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de sólidos (%)
Glenium 51	Policarboxilato	6,00 - 7,00	1,20	32,5

Fonte: BASF, [S.d.].

A água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal de Alagoas.

O aço utilizado nos corpos de prova dos ensaios de arrancamento (*pull out test*) são do tipo CA-50, aço para concreto armado, cuja resistência ao escoamento é de 500 MPa. Foram utilizadas barras com diâmetro nominais de 10 mm e 16 mm. A massa específica do aço é de 7850 kg/m<sup>3</sup>.

Utilizou-se também fibras de aço com ancoragem em gancho nas extremidades, obtidas através do processo de trefilação a frio do aço, com resistência à tração em torno de 1100 MPa. Quanto à geometria, as fibras apresentam comprimento (*l*) de 30mm e seção transversal circular com diâmetro (*d*) de 0,6mm, resultando assim em um fator de forma de 50, como mostrada na Figura 28. Conforme classificação da ABNT NBR 15530 (2007) a fibra de aço utilizada neste estudo, corresponde ao tipo denominado AI.

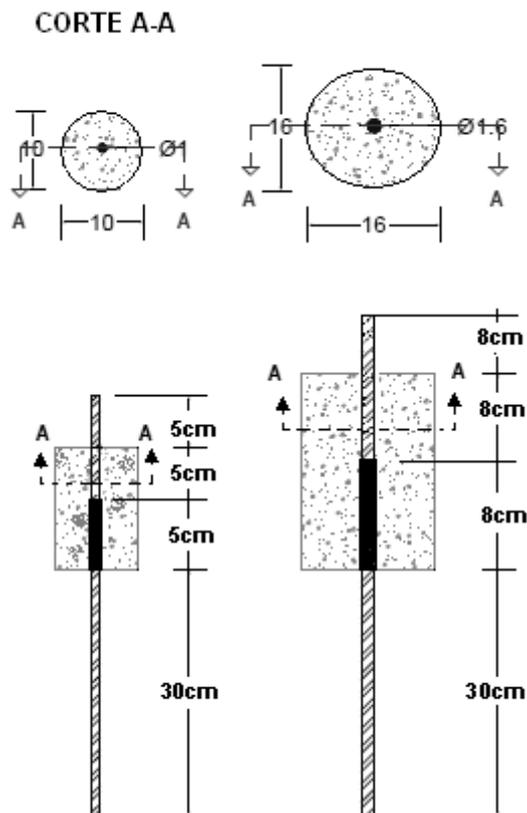
**Figura 28 – Ilustração da fibra de aço utilizada no estudo**

Fonte: BARROS (2009)

### 3.3. Produção das Formas

Para a realização do ensaio de arrancamento de barra de aço proposto, fez-se necessário a fabricação de formas que produzissem corpos-de-prova que atendessem à recomendação da RILEM/CEB/FIP (1973), principalmente quanto às dimensões necessárias. Neste trabalho foram utilizadas barra de diâmetro de 10mm e 16mm. Estas formas seguiram modelos anteriormente fabricados por FERNANDES (2000) em sua dissertação de mestrado e ALMEIDA FILHO (2006) em sua tese de doutorado. Assim, as formas foram confeccionadas com cano de PVC e madeira, utilizando braçadeiras metálicas para dar uma maior fixação durante a concretagem. Todas as formas foram feitas de tal forma que pudessem ser desmontadas e reutilizadas várias vezes, Figura 29 e 30.

Figura 29 – Esquema dos corpos de prova para barras de aço de  $\Phi 10.0$  e  $\Phi 16.0$  mm



Fonte: AUTORA (2011).

**Figura 30- Formas desmontáveis utilizadas na fabricação dos corpos de prova**



Fonte: AUTORA (2011).

Resultando assim em corpos-de-prova prontos para o ensaio de arrancamento, como os mostrados na Figura 31.

**Figura 31 – Corpos de prova com barras de 16mm e 10mm, prontos para o ensaio de arrancamento**



Fonte: AUTORA (2011).

### 3.4. Produção dos Concretos

#### 3.4.1. Dosagem dos Concretos

Conforme mencionado anteriormente, os concretos autoadensáveis, com e sem fibras metálicas, além do concreto convencional, com suas dosagens apresentadas na Tabela 14 são os mesmos estudados por CAVALCANTI (2006) e por BARROS (2009) em suas pesquisas de mestrado.

**Tabela 12 – Dosagens dos concretos utilizados nos ensaios**

Concreto	Concreto Autoadensável	Concreto Autoadensável com Fibras	Concreto Convencional
Dosagem (kg/m <sup>3</sup> )			
Cimento	400	400	400
Areia	785	785	718
Brita	790	790	1060
Água	194	194	199
RCMG	200	200	-
SPC (spc/c) = 0,6% (kg/m <sup>3</sup> )	8	8	-
PLC (plc/c) = 0,162 %	-	-	1,8
Fibras (1%)	-	78,5	-

Fonte: BARROS (2009).

#### 3.4.2. Produção dos Concretos

A produção do concreto convencional seguiu o método de dosagem da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Os agregados miúdo e graúdo foram os mesmos utilizados nas misturas de CAA e CAAF. Não foi utilizado o RCMG na mistura e utilizou-se plastificante para obter a trabalhabilidade necessária, correspondente à uma consistência do concreto fresco classificada como média, conforme a Tabela 15 apresentada por ANDOLFATO (2002).

**Tabela 13 – Classificação das consistências dos concretos.**

Consistência	Abatimento
Seca	0 a 2
Firma	2 a 5
Média	5 a 12
Mole	12 a 18
Fluida	18 a 25

Fonte: ANDOLFATO (2002).

Antes da produção dos concretos, foi calculado a quantidade de concreto necessária para a moldagem de todos os corpos de prova que seriam utilizados nos ensaios. Em seguida todos os componentes foram separados e pesados individualmente.

A sequência de colocação dos componentes da mistura na betoneira seguiu o mesmo método utilizado por BARROS (2009), respeitando os tempos de mistura necessários para cada um, como mostra a Tabela 16.

**Tabela 14 – Sequencia de colocação dos componentes do concreto na betoneira.**

Materiais colocados na betoneira	Tempo de mistura
areia + brita + água de absorção	30 segundos
cimento + RCMG*	30 segundos
parte da água de amassamento (80% da relação a/c	90 segundos
superplastificante/plastificante** + 20% da relação a/c	120 segundos
Fibras***	60 Segundos

Fonte: CAVALCANTI (2006), BARROS (2009)

Notas:

\* O RCMG foi colocado para os concretos autoadensáveis.

\*\* Superplastificante utilizado no concreto autoadensável e plastificante utilizado no concreto convencional.

\*\*\* As fibras foram colocadas no concreto autoadensável com fibras.

A Tabela 17 abaixo descreve as principais diferenças entre os concretos utilizados neste estudo.

**Tabela 15 – Principais diferenças entre os concretos estudados**

Tipos de Concreto	Dmax agragado graúdo	RCMG	Aditivo Químico	Fibras de Aço	Adensamento
CC	12,5	não	Plastificante	não	sim
CAA	12,5	sim	superplastificante	não	não
CAAF	12,5	sim	superplastificante	sim	não

Fonte: AUTORA (2011)

### 3.5. Ensaios no Estado Fresco

➤ Ensaio de Tronco de Cone:

O ensaio do tronco de cone foi realizado com o objetivo de determinar a consistência do concreto convencional, seguindo a NBR NM 67 (1998).

Ensaio de Espalhamento:

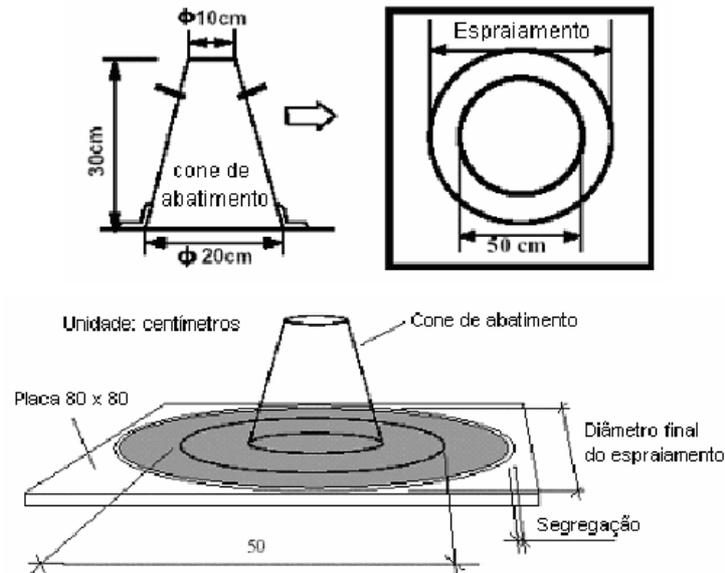
Este ensaio é proposto apenas para concretos autoadensáveis, sendo assim, foi realizado neste trabalho para o concreto autoadensável e para o concreto autoadensável com fibras. É um método simples e fácil de ser executado, e fornece a capacidade de fluidez do concreto. Todo o ensaio seguiu as recomendações da ABNT NBR 15823-2 (2010).

Para a realização deste ensaio, é necessário utilizar uma placa metálica que contenha uma marcação em círculo de 50cm de diâmetro, um cone de Abrams e cronômetro, como é mostrado no esquema da Figura 32.

O concreto deve ser lançado no interior do cone sem nenhum tipo de adensamento, e ao ser içado o cone o tempo deve ser marcado até o momento em que a massa de concreto atingir a marcação da placa. O tempo de espalhamento para ser considerado concreto autoadensável não pode estar fora do parâmetro  $5 \pm$

2s e após cessar o fluxo, é necessário medir dois diâmetros perpendiculares. A Figura 33 mostra o comportamento do concreto autoadensável após o ensaio de espalhamento.

**Figura 32 – Esquema do ensaio de espalhamento.**



Fonte: GOMES (2002); TVIKSTA (2000).

**Figura 33 – Detalhe do ensaio de espalhamento do CAA.**



Fonte: AUTORA (2011).

### 3.6. Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Devido à geometria que as formas apresentariam enquanto estivessem no processo de endurecimento do concreto, tempo que levaria 24 horas, fez-se necessário adaptar uma mesa de madeira que pudesse acomodá-los neste período. Assim, foram feitos furos no tampo da mesa, para que as barras pudessem passar por dentro deles, assim como mostra a Figura 354.

**Figura 34 – Corpos de prova acomodados para período de endurecimento**



Fonte: AUTORA (2011).

Esta mesa foi utilizada na fabricação dos 3 tipos de concreto, sendo que para o concreto convencional, foi necessário fazer mais uma adaptação pois era necessário vibrar os corpos de prova, e esta configuração de forma não permitia a penetração da agulha vibratória, assim, a mesa de madeira foi colocada em cima da mesa vibratória, Figura 35, e foi alcançado um resultado satisfatório.

**Figura 35 – Adaptação para a vibração dos corpos de prova**



Fonte: AUTORA (2011).

Segundo pesquisa realizada na revisão bibliográfica, a posição da barra durante a concretagem influencia muito na aderência desta ao maciço de concreto, sendo maior quando a barra estiver na posição vertical, assim sendo, todos os corpos de prova foram concretados com a barra na posição vertical, Figura 36.

**Figura 36 – Corpo de prova concretado cm a barra na posição vertical**



Fonte: AUTORA (2011).

Todos os corpos de prova foram moldados de uma só vez, logo após o ensaio de espalhamento e comprovação de sua autoadensabilidade.

Para cada dosagem de concreto produzido, foram moldados 5 peças para ensaio de arrancamento (*pull out test*) com barras de 10 mm, 5 peças para ensaio de arrancamento (*pull out test*) com barras de 16 mm, como é recomendado pela RILEM-CEB-FIP (1973) produzidos com as mesmas condições para cada diâmetro de barra, para os ensaios de compressão e módulo de elasticidade foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro, de acordo com as recomendações das normas ABNT NBR 5739 (1994) e ABNT NBR 8522 (2008) respectivamente

### **3.7. Cura dos Corpos de Prova**

Todos os corpos de prova foram desmoldados após 24 horas, identificados e colocados dentro do tanque de imersão, onde permaneceram até a idade de realização dos ensaios de 28 dias.

### 3.8. Ensaios no Estado Endurecido

➤ Ensaio de Compressão Axial:

Para o ensaio de compressão axial, foram utilizados 3 corpos-de-prova cilíndricos 10cm x 20 cm para cada concreto. Usou-se uma prensa, Figura 37, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 5739 (1994) – *Ensaio de Compressão para Corpos de Prova Cilíndricos de Concreto*.

Figura 37 – Ensaio de compressão axial.

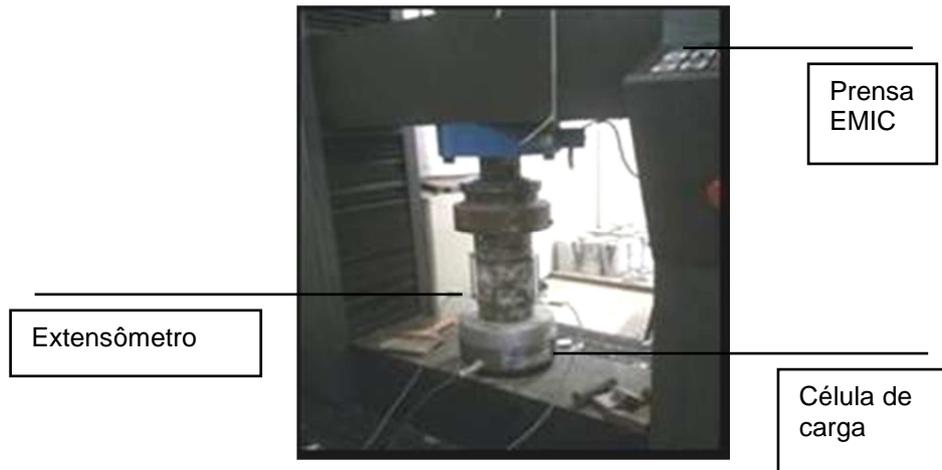


Fonte: AUTORA (2011).

➤ Ensaio do Módulo de Elasticidade:

O ensaio do módulo de elasticidade foi realizado para os concretos estudados seguindo as recomendações da norma NBR 8522 – *Determinação do Módulo Estático de Elasticidade à Compressão* (2008) utilizando corpos-de-prova cilíndricos 10cmx20cm. Os equipamentos utilizados foram: prensa EMIC, célula de carga e extensômetros, conforme pode ser observado no esquema da Figura 38.

**Figura 38 - Ensaio do módulo de elasticidade.**



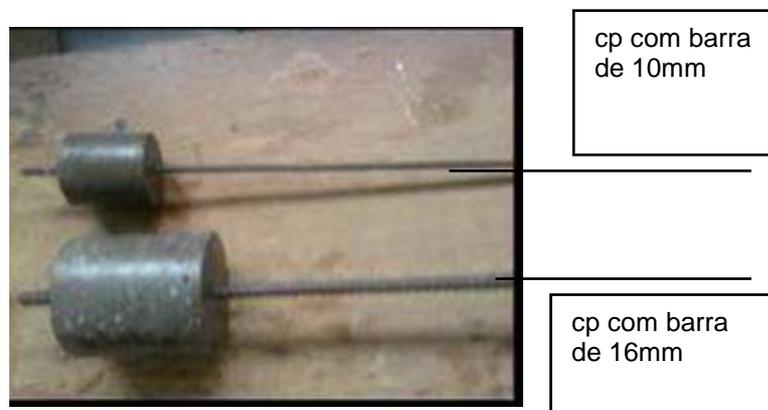
Fonte: AUTORA (2011).

➤ Ensaio de Arrancamento:

O ensaio de arrancamento (*pull out test*) proposto nesta pesquisa seguiu as recomendações da RILEM-CEB-FIP 7-II-28 D – *Bond Test of Reinforcing Steel*, da tese de doutorado de ALMEIDA FILHO (2006) e da dissertação de mestrado de FERNANDES (2000), nos procedimentos seguidos.

Os corpos-de-prova produzidos para a realização do ensaio de arrancamento possuíam duas dimensões diferentes, recomendadas para as barras de 10mm e 16mm de diâmetro, como mostra a Figura 39.

**Figura 39 – Corpos de prova com barras de 10mm e 16mm para ensaio de ar.**



Fonte: AUTORA (2011).

Para a aquisição dos dados, os equipamentos utilizados foram um computador com os software CATMAN que recebia os dados tempo, carga e deslocamento simultaneamente a cada 0,2 segundos durante todo o ensaio, através do sistema de aquisição de dados SPIDER 8 ao qual estavam conectados o LVDT e a célula de carga. Estes dados ficaram armazenados em planilhas eletrônicas, que posteriormente foram transformados em curvas, no qual era possível fazer as análises, como mostra a Figura 40.

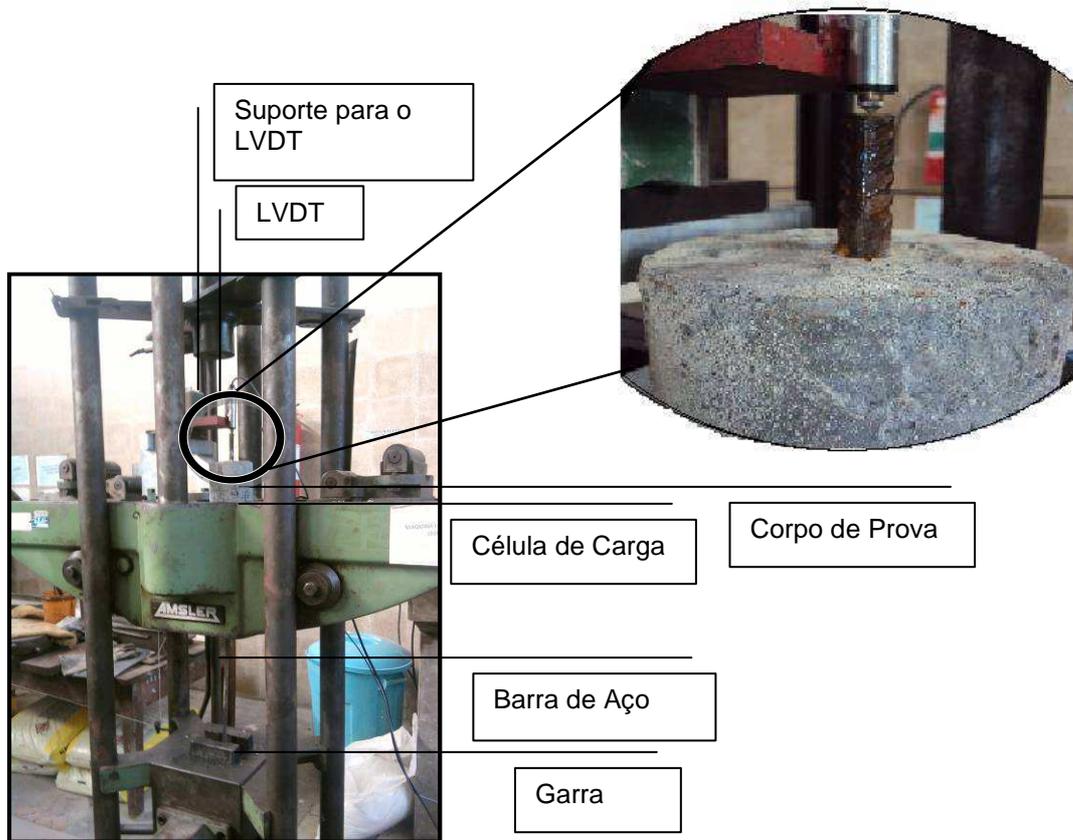
**Figura 40 – Equipamentos utilizados para aquisição de dados.**



Fonte: AUTORA (2011).

Os ensaios de arrancamento da barra foram realizados como mostra o esquema da Figura 41, tanto para os corpos de prova com barras de 10 mm quanto para os com barra de 16 mm, adaptando apenas a garra que prende a barra de aço.

Figura 41 – Ensaio de arrancamento (*Pull Out Test*).



Fonte: AUTORA (2011).

## Capítulo 4: Apresentação e Análises dos Resultados

### 4.1. Introdução

Neste capítulo, os resultados obtidos nos ensaios dos concretos nos estados fresco e endurecido serão apresentados e analisados com base na revisão bibliográfica.

### 4.2. Propriedades no Estado Fresco

No estado fresco as propriedades de trabalhabilidade dos concretos foram determinadas através dos ensaios de abatimento de tronco de cone para concreto convencional e ensaio de espalhamento (*slump flow test*) para o concreto autoadensável e o concreto autoadensável com fibras.

O resultado do ensaio de abatimento de tronco de cone foi de 80 mm, que de acordo com a classificação apresentada por ANDOLFATO (2002) corresponde a uma consistência média. Os resultados do ensaio de espalhamento são mostrados na Tabela 18:

**Tabela 16 – Resultado do ensaio de espalhamento do CAA e CAAF.**

Concreto	T50 (s)	D1 (mm)	D2(mm)	Df(mm)
CAA	2	810	790	800
CAAF	7	600	620	610

Fonte: AUTORA (2011).

De acordo com a Tabela 9, observa-se que o CAA encontra-se na classificação SF3, sendo o tipo de concreto que pode ser utilizado em estruturas com alta densidade de armadura e arquitetura complexa, e é o concreto que possui a melhor qualidade de acabamento, porém mais difícil de controlar a segregação, fato este que não ocorreu com o CAA produzido nesta pesquisa.

O concreto autoadensável com fibras, como era de se esperar, perdeu um pouco de sua capacidade de fluidez, pois com a adição de fibras, parte da pasta que serviria para transportar os agregados da mistura durante o fluxo do concreto foi

consumida no envolvimento das fibras metálicas, dificultando o fluxo do concreto e aumentando a resistência ao movimento pela engrenagem das fibras com o agregado graúdo. Segundo a Tabela 9 o CAAF foi classificado como SF1, podendo ser utilizado apenas em estruturas como lajes, revestimento de túneis, estacas e certas fundações profundas, este concreto também não apresentou segregação.

Através dos resultados obtidos pode-se observar que ocorreu uma redução de 23,75% em média da capacidade de fluidez do concreto apenas com a adição das fibras de aço, e um aumento de 3,5 vezes no tempo necessário para atingir o T50, resultado semelhante obtido por BARROS (2009).

### 4.3. Propriedades no Estado Endurecido

Um aspecto que justifica a importância do estudo das propriedades do CAA no estado endurecido está associado à composição da mistura do CAA, que é bastante diferenciada dos concretos convencionais KLUG *et al* (2003). Desta forma, foram realizados os ensaios de compressão, ensaios de módulo de elasticidade e ensaios de arrancamento da barra de aço, todos realizados aos 28 dias.

#### ➤ Resistência à Compressão:

Os resultados médios da compressão aos 28 dias, desvio padrão e coeficiente de variação estão representados na Tabela 19.

**Tabela 17 – Resultado do ensaio de compressão médio, desvio padrão e coeficiente de variação para os corpos de prova de CC, CAA e CAAF.**

Tipo de Concreto	Fc (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
CC	34,5	2,68	7,7
CAA	35,0	1,80	5,1
CAAF	36,0	0,19	0,52

Fonte: AUTORA (2011).

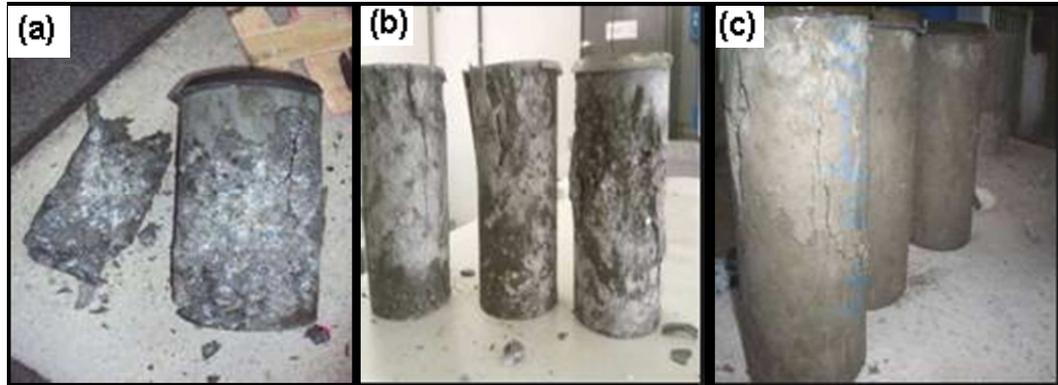
BENTUR E MINDESS (2007) afirmam que a adição de fibras produz um pequeno ou nenhum aumento na resistência à compressão do concreto. O objetivo

da adição de fibras ao concreto não é alterar a resistência à compressão do mesmo, e sim aumentar a tenacidade, mudando significativamente o comportamento pós-pico do material, levando-o a atingir níveis de deformação específica maiores até a ruptura. Desta forma, os resultados aqui obtidos vão de encontro ao conhecido na literatura, e, apesar da pouca diferença entre as resistências médias à compressão, os corpos de prova de concreto autoadensável com fibras não apresentaram grandes fraturas após atingir sua carga máxima, permanecendo praticamente íntegros ao fim do ensaio. Isso possivelmente ocorreu devido a um aumento da tenacidade obtida pela incorporação das fibras metálicas e pela capacidade das fibras interceptarem as fissuras retardando o prolongamento destas.

O concreto autoadensável, por possuir em sua mistura um material de granulometria bastante fina, o RCMG, possivelmente apresenta uma menor quantidade de vazios em seu interior, e conseqüentemente uma microestrutura mais densa, capaz de suportar mais carga, desta forma, observou-se que o CAA obteve uma resistência a compressão maior que o CC, assim como o CAAF obteve uma resistência à compressão maior que o CAA, porém, este acréscimo foi relativamente baixo, se comparado, por exemplo, ao resultado encontrado por BARROS (2009), que observou um aumento em torno de 12,9% na resistência a compressão do CAA em relação ao CC, nesta pesquisa este acréscimo foi de apenas 1,42%, já em relação ao acréscimo de carga do CAAF em relação ao CAA, o resultado encontrado nesta pesquisa foi de 2,77%, enquanto que BARROS (2006) obteve um valor de 10,3%.

Além do aumento da capacidade de carga suportada, uma diferença observada durante o ensaio de compressão axial foi que ao atingir a carga máxima os corpos de prova de concreto convencional partiram-se em vários pedaços, já os corpos de prova de concreto autoadensável apresentaram fendilhamento, porém o corpo manteve-se praticamente todo unido, já os corpos-de-prova de concreto autoadensável com fibras apresentaram fendilhamento de menor espessura, Figuras 42 (a), (b) e (c).

**Figura 42 – (a) CP de concreto convencional, (b) CP de concreto autoadensável e (c) CP de concreto autoadensável com fibras após ensaio de compressão axial.**



Fonte: AUTORA (2011).

➤ Módulo de Elasticidade:

O módulo de elasticidade do concreto varia em função das matérias-primas utilizadas e de sua resistência mecânica, e, segundo a maioria dos estudos de concreto reforçado com fibras, as fibras simplesmente atuam como inclusões rígidas na matriz, sem produzir muito efeito na estabilidade dimensional do compósito.

Vale salientar que o módulo de elasticidade de uma matriz cimentícia varia no tempo, especialmente nas primeiras idades. Em alguns casos, as fibras são empregadas justamente para elevar o módulo do compósito em idades baixas, para impedir que ocorra fissuração. Entretanto, segundo FIGUEIREDO (2000), os cimentos atuais em conjunto com aditivos aceleradores de pega e redutores de água, propiciam um elevado ganho de resistência inicial, e em paralelo, um rápido incremento do módulo de elasticidade.

O resultado encontrado neste trabalho para o módulo de elasticidade foi de 29,30 GPa para o concreto autoadensável, já para o concreto autoadensável com a incorporação de 1% de fibras o módulo de elasticidade foi de 27,10 GPa, apresentando assim uma redução de 7,5%. Na pesquisa de BARROS (2009), também foi observado que o módulo de elasticidade dos concretos estudados sofreu

uma redução de 10,6% após a incorporação de 1% de fibras de aço comparado com o concreto sem reforço de fibras.

Tal resultado vai de encontro com o que normalmente é apresentado na literatura, como citam MEHTA e MONTEIRO (1994), indicando a pouca influência das fibras no módulo de elasticidade do concreto. ALTUNR *et al* (2007), verificaram em seus estudos, sensíveis reduções no módulo de elasticidade dos concretos após a incorporação das fibras de aço. Um resumo dos resultados obtidos no ensaio de módulo de elasticidade é apresentado na Tabela 20 a seguir.

**Tabela 18 - Resultado do ensaio do módulo de elasticidade, desvio padrão e coeficiente de variação.**

Tipos de Concreto	Ec (GPa) Média	Desvio Padrão (GPa)	Coef. Variação (%)
CC	27,5	0,98	3,5
CAA	29,30	0,83	2,8
CAAF	27,10	1,87	6,9

Fonte: AUTORA (2011).

➤ Pull Out Test:

A Tabela 21 apresenta a carga última aplicada a cada corpo-de-prova ensaiado, no momento em que é perdida a aderência entre a barra de aço e o concreto. Em alguns corpos-de-prova, a perda da aderência ocorreu por deslizamento da barra dentro do maciço de concreto, como mostrado na Figura 43, já em outros, o que ocorreu foi a quebra do maciço de concreto acarretando na perda da aderência. Esta quebra algumas vezes se deu apenas pelo aparecimento de uma rachadura ao longo do diâmetro do cilindro como mostra a Figura 44, e outras vezes da partição total deste cilindro em partes iguais, como mostra a Figura 45.

**Tabela 19 – Carga última aplicada aos corpos de prova durante o ensaio de arrancamento de barra.**

Ø	CC			CAA			CAAF		
	Carga última (KN)	Tipo de ruptura	Média	Carga última (KN)	Tipo de ruptura	Média	Carga última (KN)	Tipo de ruptura	Média
10mm	24,02	D	24,53	34,32	F	22,26	32,35	D	34,97
	22,16	D		33,33	F		37,26	F	
	25,98	D		30,39	F		35,30	D	
16mm	53,44	D	55,49	68,73	F	67,88	71,58*	D	75,99
	56,87	D		64,42	F		79,91*	F	
	56,18	F		70,50	F		76,48*	D	

Fonte: AUTORA (2011).

Nota: \* Nestes corpos de prova ocorreu um barulho semelhante a uma explosão no momento em que se atingiu a carga última.

F = Fendilhamento

D = Deslizamento da barra

**Figura 43 – Corpo de prova com perda de aderência por deslizamento.**



Fonte: AUTORA (2011).

**Figura 44 – Corpos de prova apresentando uma rachadura ao longo de seu diâmetro.**



Fonte: AUTORA (2011).

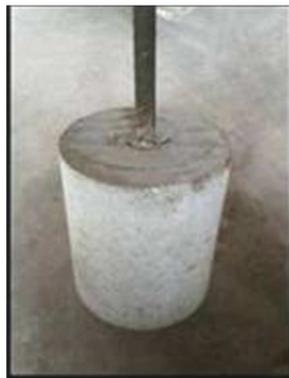
**Figura 45– Corpo de prova quebrado em partes iguais ao longo de seu diâmetro.**



Fonte: AUTORA (2011).

A partição do cilindro em dois ocorreu apenas em corpos de prova de concreto autoadensável. Nos concretos autoadensáveis com fibras, o que ocorreu na maioria dos corpos de prova foi que, no momento em que se atingiu a carga última ouviu-se um barulho alto semelhante a uma explosão e observou-se que a aderência havia sido perdida, pois a carga só diminuía, seguindo do deslizamento da barra de aço. A particularidade observada para estes corpos de prova foi que estes não apresentaram nenhum fendilhamento. A maioria dos corpos-de-prova, principalmente os de barra de 16 mm não apresentaram fendilhamento ao fim do ensaio, Figura 46, e o fendilhamento que apareceu em corpos-de-prova de barras de 10 mm de concreto autoadensável com fibras tinham abertura muito inferior àquelas observadas nos corpos-de-prova de concreto autoadensável, Figura 47.

**Figura 46 – Corpos de prova de CAAF com barra de 16mm que apresentaram um alto barulho ao perder a aderência, não apresentam rachaduras**



Fonte: AUTORA (2011).

**Figura 47 – Rachadura em corpo de prova de concreto autoadensável com fibras com barras de 10 mm**



Fonte: AUTORA (2011).

Para o concreto convencional, apenas alguns corpos-de-prova com barras de 16 mm apresentaram rachaduras no término do ensaio. Os corpos de prova com barra de 10 mm apresentaram perda de aderência por deslizamento, e, todas as barras apresentavam concreto em suas nervuras, Figura 48. A carga última apresentada foi menor que a carga última apresentada para os concretos autoadensáveis.

**Figura 48 – Nervuras com concreto após a perda de aderência por deslizamento da barra, para ensaio de arrancamento em corpo de prova de CC com barras de 10mm**



Fonte: AUTORA (2011).

Dois corpos de prova, um com barra de 10 mm e um com barra de 16 mm de concreto autoadensável com fibras foram serrados ao meio longitudinalmente após o ensaio de arrancamento da barra, para que fosse observada a distribuição das fibras ao longo do cilindro, como mostra a Figura 49 (a), (b) e (c).

**Figura 49 – (a) corpo de prova de CAAF sendo cortado longitudinalmente, (b) distribuição das fibras no corpo de prova de barra de 16 mm e (c) distribuição das fibras no corpo de prova de barra de 10 mm.**



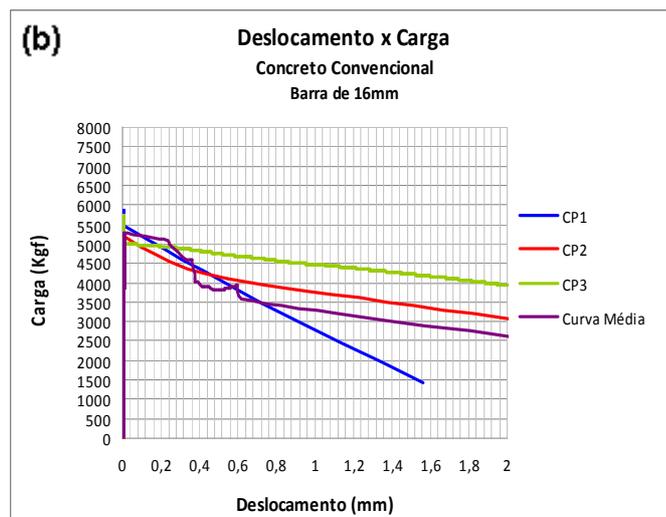
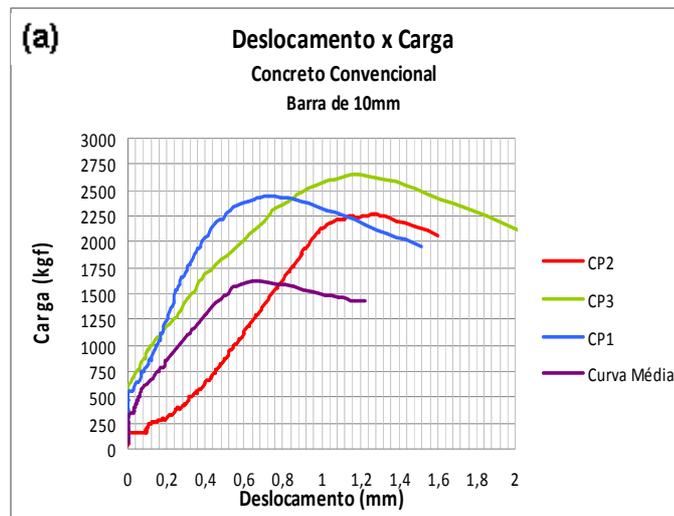
Fonte: AUTORA (2011).

Como se pode observar, as fibras de aço distribuíram-se por igual em todo o maciço, não apresentando nichos nem regiões sem a presença destas.

➤ Gráficos para o Ensaio de Pull Out Test:

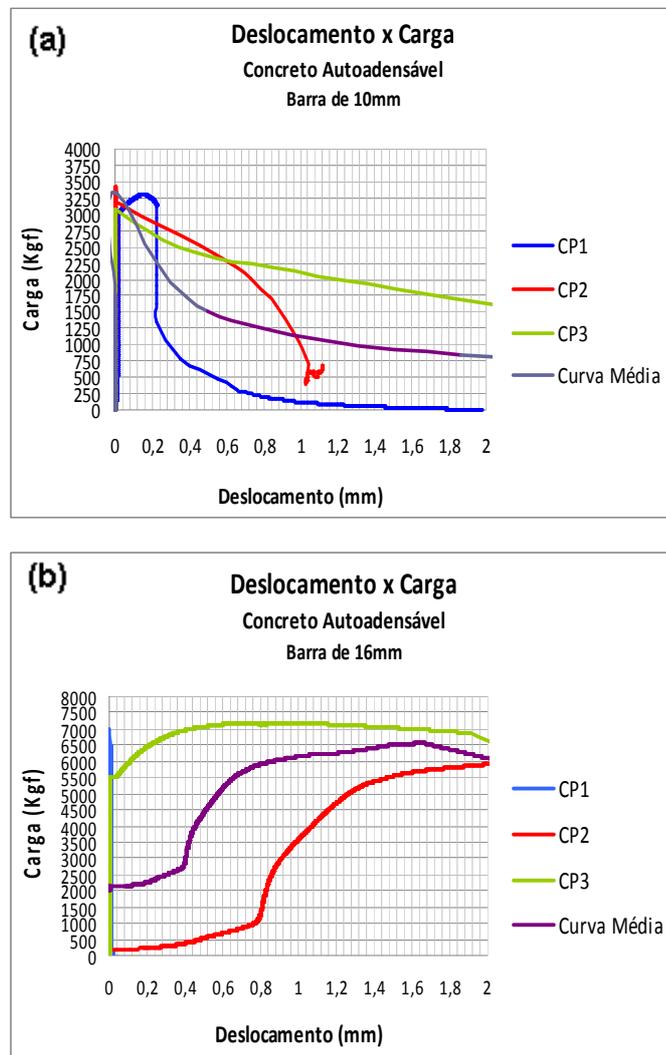
Os gráficos das Figuras 50 (a) e (b), Figuras 51 (a) e (b) e Figuras 52 (a) e (b), foram produzidos com os dados obtidos nos ensaios de arrancamento. Neles são mostrados os resultados de 3 corpos-de-prova escolhidos por representarem melhor o comportamento da aderência. Assim, com o resultado de cada CP, foi criada uma curva média que melhor representasse o comportamento de cada concreto, para posteriormente serem analisados comparativamente quanto ao tipo de concreto usado e quanto à bitola da barra de aço utilizada.

Figura 50– Gráficos do ensaio de arrancamento para concreto convencional com barra de (a) 10mm e (b) 16mm.



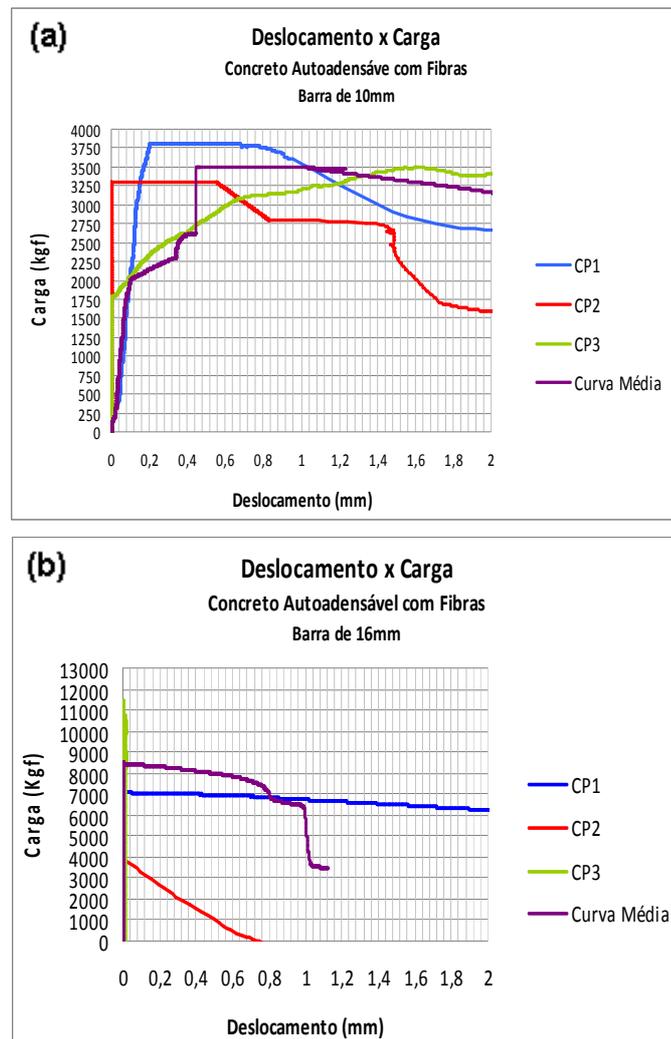
Fonte: AUTORA (2011).

Figura 51 – Gráficos do ensaio de arrancamento para concreto autoadensável com barra de (a) 10mm e (b)16mm.



Fonte: AUTORA (2011).

**Figura 52 – Gráficos do ensaio de arrancamento para concreto autoadensável com fibras com barra de 10mm e 16mm.**



Fonte: AUTORA (2011).

Diante dos gráficos apresentados pode-se tecer alguns comentários:

- ✓ Pode-se observar pelo traçado das curvas que no geral é apresentado um comportamento classificado como rígido-plástico, isso é, o material resiste muito quase sem deformar até atingir a tensão de ruptura e depois começa a perda de sua capacidade portante, momento no qual as deformações se tornam mais significativas.
- ✓ O concreto convencional apresentou um maior desvio padrão e coeficiente de variabilidade nos resultados de seus cp's;

- ✓ Para o concreto convencional, todos os cps de barra de 10 mm perderam a aderência por deslizamento da barra, e apenas em alguns casos ocorreu ruptura por fendilhamento, porém só em cp's com barras de 16 mm;
- ✓ Os cp's de concreto autoadensável com fibras e com barras de 10 mm apresentaram aberturas de fendilhamento muito finas, praticamente imperceptíveis, com sequencia de ruptura por deslizamento da barra. Para os cp's de barra de 16 mm, praticamente todos os cp's apresentaram um barulho muito alto parecido ao de uma explosão com sequencia de ruptura por deslizamento da barra, este barulho acontecia no exato momento da perda da aderência aço-concreto.
- ✓ A presença das fibras retarda o início da fissuração assim como a sua propagação no maciço de concreto durante o ensaio, e estas quando apareceram apresentaram abertura muito inferior às aberturas apresentadas nas fissuras de CAA. A presença das fibras confere mais deformabilidade, por um lado promove a formação de muitas microfissuras em vez de uma única maior, característica de ruptura mais frágil, típica do concreto. Por outro lado eleva também a carga de ruptura.

#### **4.4. Modelos para a curva Tensão de Aderência x Deslizamento**

Para a modelagem do comportamento de aderência existem várias abordagens: teórica, experimental, numérica. Pela complexidade do fenômeno de aderência nenhuma destas abordagens isoladas consegue propor um modelo de análise fechado, devendo um ser usado como complemento do outro. Em geral, os pesquisadores têm utilizado estudos experimental-analítico ou numérico-experimental para calibrar e validar algumas propostas de leis constitutivas para o comportamento de aderência, considerando inclusive, os aspectos que caracterizam a interface aço-concreto.

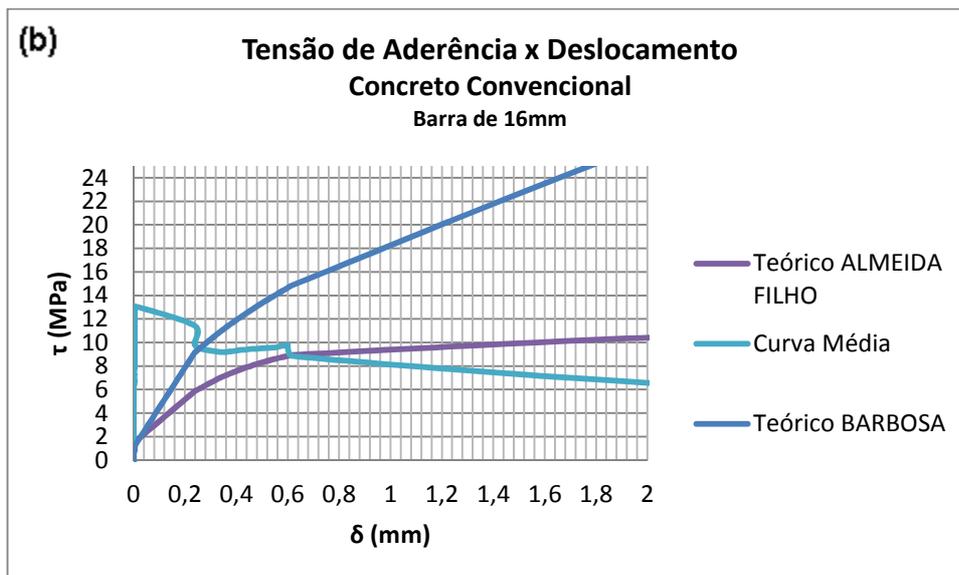
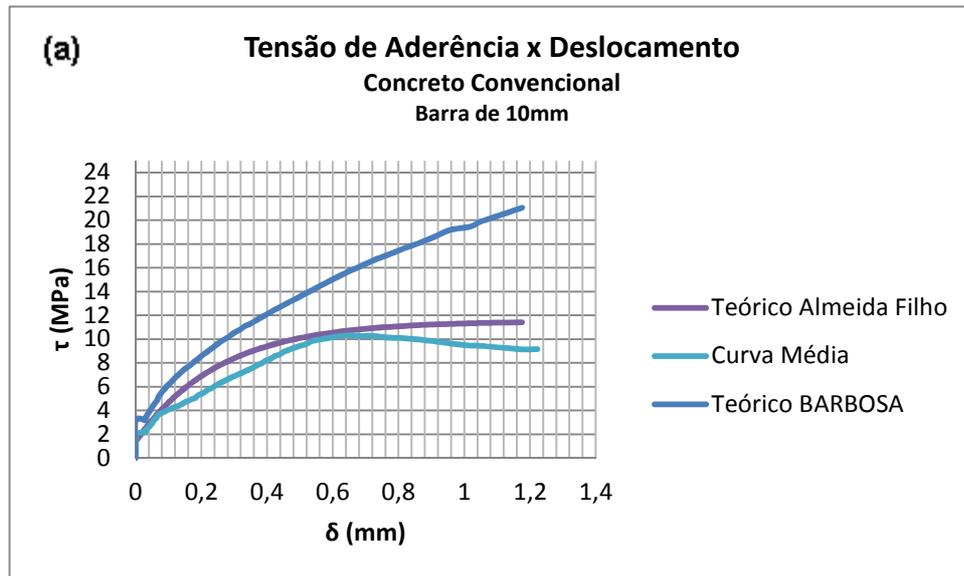
Neste tópico, serão apresentadas algumas comparações entre os resultados obtidos no ensaio de arrancamento e dois modelos teóricos existentes, um proposto por BARBOSA (2001), que utilizou uma análise estatística de dados experimentais, e outro por ALMEIDA FILHO (2006), que utilizou uma análise numérica

experimental, para a elaboração dos modelos das curvas tensão de aderência x deslocamento. Além disso, é apresentado um modelo proposto por HARAJLI (1995) para curva tensão de aderência versus deslizamento para concretos com fibras.

#### **4.4.1. Curvas comparativas do ensaio experimental e dos modelos propostos por Barbosa (2001) e Almeida Filho (2006)**

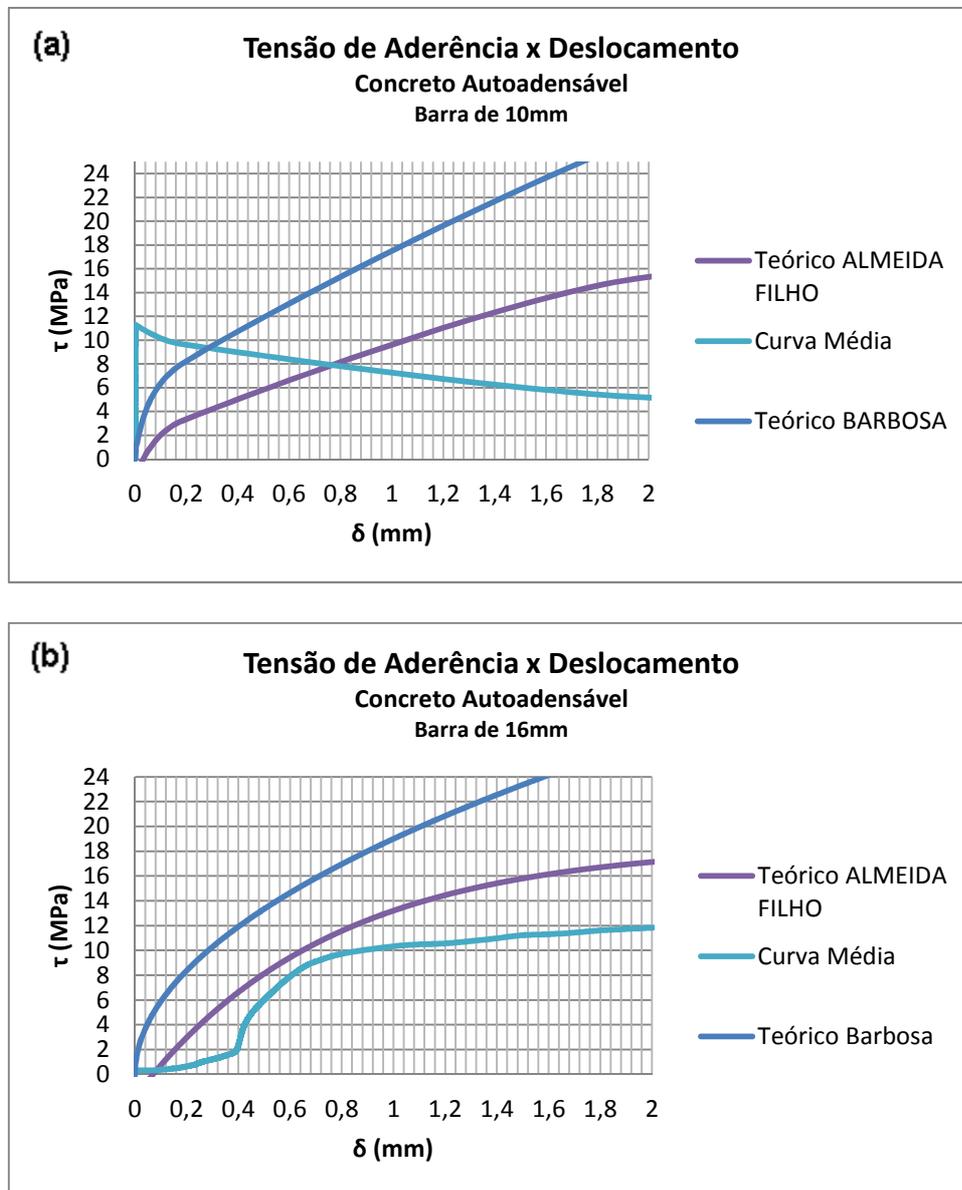
Para a modelagem da curva tensão de aderência x deslizamento, BARBOSA (2001) propõe um valor máximo para o deslizamento, como mostrado na Equação 12, que leva em consideração apenas a bitola da barra utilizada. Com este deslizamento máximo é calculada uma tensão de aderência, através da Equação 11. Já ALMEIDA FILHO (2006), em sua pesquisa, desenvolveu uma modelagem numérica para a representação da aderência aço-concreto, envolvendo as leis constitutivas dos materiais. Estas leis procuram representar o comportamento dos materiais separadamente, que neste caso particular foram três: o concreto, o aço e a zona de contato. Os modelos desenvolvidos foram moldados para concreto autoadensável e concreto convencional com diferentes classes de resistência a compressão e diferentes diâmetros de barra de aço. Nas Figuras 53 a 55 são apresentadas curvas tensão de aderência x deslocamento utilizando os valores encontrados no ensaio experimental, a modelagem de BARBOSA (2001) e a modelagem de ALMEIDA FILHO (2006) e a Tabela 22 a seguir mostra os valores obtidos da tensão máxima de aderência.

**Figura 53 – Curvas de tensão de aderência x deslocamento para concreto convencional com barra de (a)10mm e (b)16mm no modelo teórico de Barbosa, e teórico de Almeida Filho e experimental.**



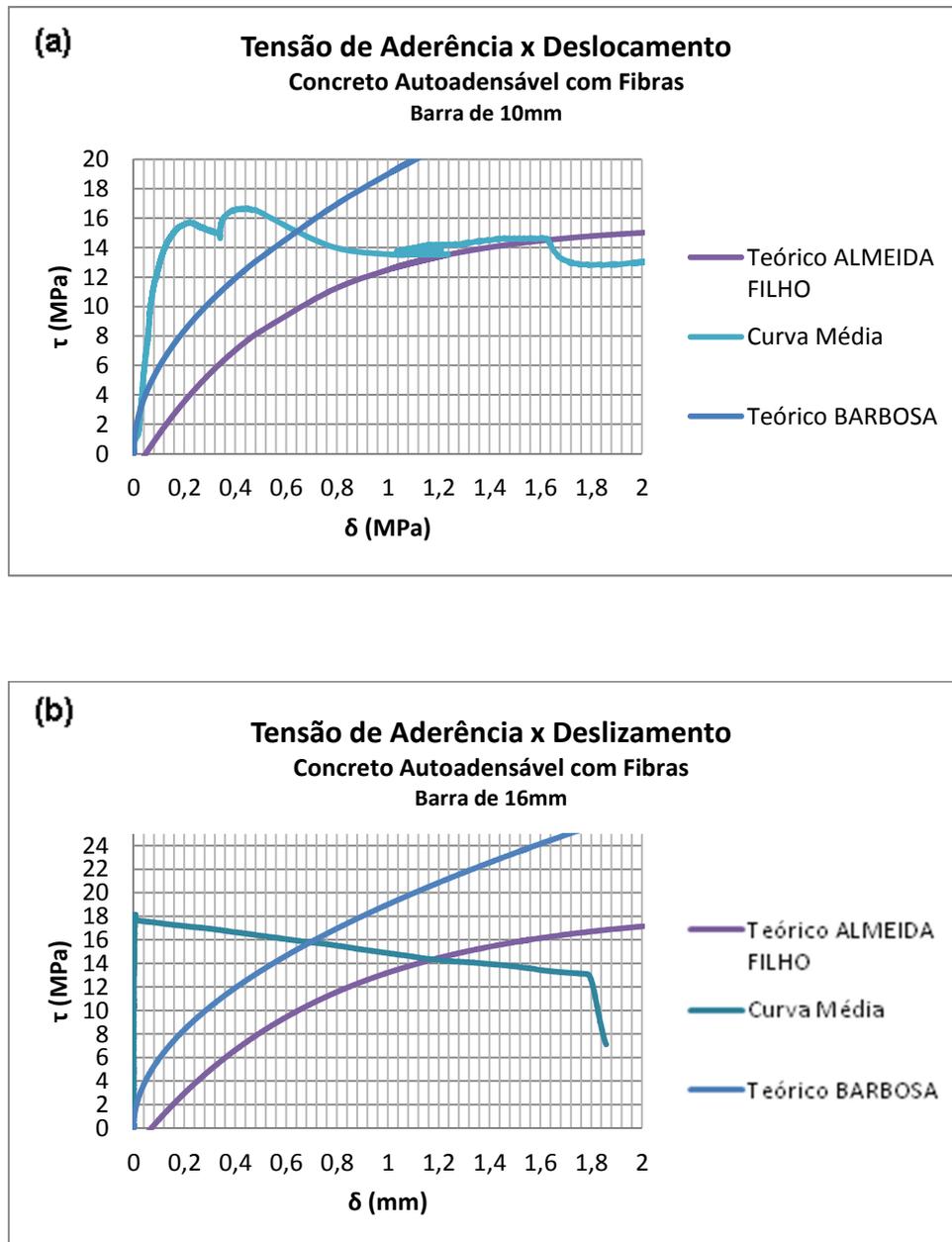
Fonte: AUTORA (2011).

Figura 54 – Curvas de tensão de aderência x deslocamento para concreto auto adensável com barra de (a)10mm e (b)16mm no modelo teórico de BARBOSA, teórico de ALMEIDA FILHO e experimental.



Fonte: AUTORA (2011).

Figura 55 – Curvas de tensão de aderência x deslocamento para concreto autoadensável com fibras com barra de (a)10mm e (b)16mm no modelo teórico de BARBOSA, teórico de ALMEODA FILHO e experimental.



Fonte: AUTORA (2011).

**Tabela 20 – Valores máximos da tensão de aderência atingida pelo modelo de BARBOSA (2001), pelo modelo de ALMEIDA FILHO (2006) e experimental.**

Concreto	Modelo de Barbosa		Modelo de Almeida Filho		Tensão Máx. Experimental (MPa)
	Deslocamento máx. $\delta$ (mm)				
CC10	1,2	21,05	1,22	11,45	10,35
CC16	1,6	24,80	4,17	10,58	13,05
CAA10	1,2	20,50	3,70	15,82	11,55
CAA16	1,6	25,50	7,93	18,52	11,70
CAAF10	1,2	21,85	7,29	15,56	17,01
CAAF16	1,6	24,50	9,20	18,52	19,00

Fonte: AUTORA (2011).

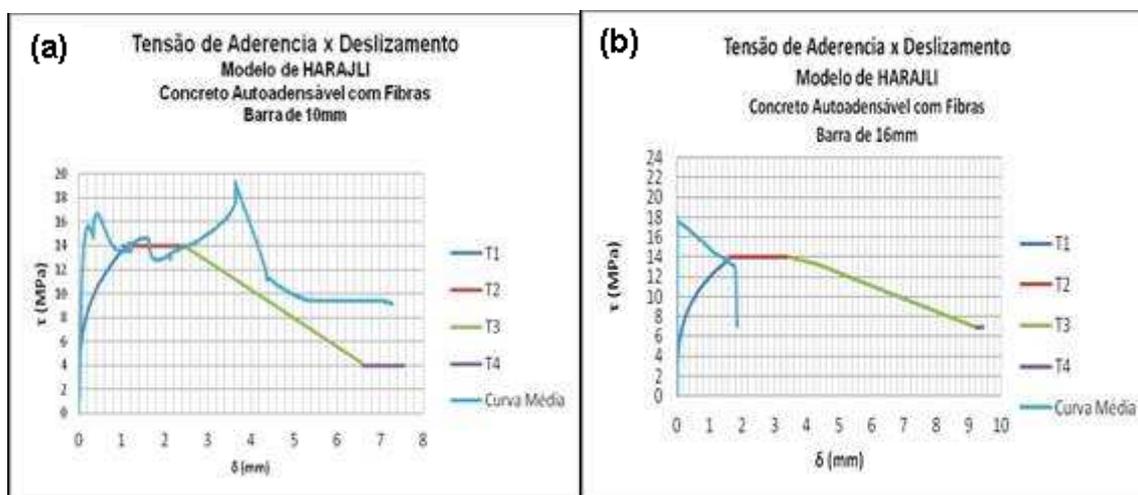
Com os resultados obtidos na Tabela 22 observa-se que nos três concretos estudados os valores da tensão máxima segundo o modelo de BARBOSA (2001) são superiores aos valores obtidos da forma experimental. Apesar do modelo proposto pela autora levar em consideração apenas a bitola da barra e duas classes de compressão do concreto optamos por utilizá-la para observar se a variação do concreto causaria também muita influência.

Observa-se que os valores teóricos das tensões encontrados para os concretos convencional e autoadensável foram superiores aos valores experimentais, já no concreto autoadensável com fibras aconteceu o inverso. Nas formulações propostas por de ALMEIDA FILHO (2006) não foram levadas em consideração a presença de fibras, mesmo assim esta foi utilizada aqui para observarmos se ocorreriam grandes variações.

#### **4.4.2. Modelo para Concreto com Fibras**

No modelo proposto por HARAJLI (1995), baseado nos trabalhos ELIGEHAUSEN *et al* (1983), foi criado um tipo de curva para a ruptura por arrancamento, onde a curva é dividida em quatro estágios (T1,T2,T3 e T4). Assim, as curvas para o concreto autoadensável com fibras apresentaram a forma mostrada acima na Figura 56.

**Figura 56 – Curva proposta por HARAJLI e a curva média experimental para concreto autoadensável com fibras com barras de (a) 10mm e (b)16mm.**



Fonte: AUTORA (2011).

A formulação proposta por HARAJLI foi a única na bibliografia encontrada para representar o comportamento do concreto com fibras, porém ainda assim apenas para concreto convencional.

Os principais fatores observados que influenciaram a tensão máxima de aderência e a curva tensão de aderência x deslizamento para este trabalho foram os diâmetros das barras utilizadas, o tipo de concreto utilizado e a presença ou não de fibras.

#### **4.5. Prescrição da NBR 6118 para Tensão de Aderência**

Em seu item 9.3.2 a ABNT NBR 6118 (2003) apresenta uma expressão que fornece o valor da resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto na ancoragem de armaduras passivas, levando-se em consideração a presença ou não de nervuras na barra, o diâmetro da barra e a situação de boa ou má aderência. Assim, utilizando a Equação 10 encontrou-se o valor da tensão máxima mostrado na Tabela 23.

**Tabela 21– Valores máximos da tensão de aderência segundo a NBR 6118 (2003) e pelo modelo experimental.**

Concreto	Fc (MPa)	Tmáx. (MPa) NBR 6118	Tmáx. (MPa) Experimental
CC 10	34,5	3,57	10,35
CC 16	34,5	3,57	13,05
CAA 10	35	3,62	11,55
CAA 16	35	3,62	14,00

Fonte: AUTORA (2011).

#### 4.6. Análise do Comportamento do Aço

Neste tópico é feita uma rápida análise do comportamento da barra de aço que foi arrancada dos corpos de prova ensaiados para saber se a tensão aplicada nela provocou escoamento.

O aço utilizado nos corpos de prova dos ensaios de arrancamento (*pull out test*) é do tipo CA-50 – aço para concreto armado, cuja resistência ao escoamento vale 500 MPa.

Com a equação 36 mostrada abaixo, é possível calcular a tensão máxima que cada barra suportou durante o ensaio, utilizando-se da força máxima registrada no momento da perda da aderência.

$$T=F/A \quad \text{Eq. 36}$$

Onde,

F → Força máxima registrada;

T → Tensão de suportada pela barra;

As → Área da seção transversal da barra de aço;

Φ10    As → 0,78cm<sup>2</sup>

Φ16    As → 2cm<sup>2</sup>

Desta forma, comparou-se a tensão que cada barra suportou com a tensão de escoamento do aço, que é de 5000 Kg/cm<sup>2</sup>, como é demonstrado na Tabela 24 a seguir, onde observa-se que nenhuma barra de aço de corpo de prova ensaiado atingiu o valor necessário para iniciar o processo de escoamento.

**Tabela 22– Análise do Comportamento do Aço**

Análise do Comportamento do Aço				
Concreto	Bitola (mm)	Carga Última de perda de aderência (KN)	Tensão ultima suportada (MPA)	Situação da Barra
CAA	Φ 10	34,32	437,03	Não escoou
		33,33	424,54	Não escoou
		30,39	387,08	Não escoou
	Φ 16	68,73	341,91	Não escoou
		64,42	320,45	Não escoou
		70,50	350,69	Não escoou
CAAF	Φ 10	32,35	412,05	Não escoou
		37,26	474,49	Não escoou
		35,30	449,51	Não escoou
	Φ 16	71,58	356,06	Não escoou
		79,91	397,52	Não escoou
		76,48	380,45	Não escoou
CC	Φ 10	24,02	305,92	Não escoou
		22,16	282,19	Não escoou
		25,98	330,89	Não escoou
	Φ 16	53,44	265,82	Não Escoou
		56,87	282,90	Não escoou
		56,18	279,48	Não escoou

Fonte: AUTORA (2011).

## Capítulo 5: Considerações Finais

O ensaio de espalhamento, realizado com o concreto autoadensável no estado fresco, mostrou uma diminuição no diâmetro final de espalhamento deste concreto, e um aumento no T50 após a incorporação das fibras de aço, mostrando assim que estas diminuem significativamente a trabalhabilidade deste concreto, pois a fibra consome parte da pasta do concreto que serviria para o transporte dos agregados do concreto. Desta forma, pode se fazer necessário um ajuste na dosagem do concreto, a fim de torná-lo mais fluido com a presença das fibras metálicas, isto pode ocorrer com um aumento na adição de superplastificante, tomando o devido cuidado para que a mistura não segregue.

Para o ensaio de compressão, foi observado um aumento em média de 2,8% da carga de rompimento do concreto autoadensável com fibras em comparação ao concreto autoadensável, confirmando assim que a presença das fibras ocasiona um aumento na resistência a compressão. Apesar deste aumento não ter sido muito significativo, os corpos-de-prova de concreto autoadensável com fibras apresentaram poucas fraturas após atingir a carga de rompimento, enquanto que os corpos-de-prova de concreto convencional geralmente se partiram em dois ou mais pedaços. Isto se dá pelo fato de que as fibras de aço ajudam a manter o maciço unido mesmo após o rompimento.

O módulo de deformação para o concreto autoadensável mostrou-se 7,5% em média maior que o concreto autoadensável com fibras, resultado semelhante ao encontrado por Barros (1999), no qual verificou uma redução de 10,6% no módulo de elasticidade do concreto autoadensável com fibras em relação ao concreto autoadensável. Tal resultado segue o que geralmente é encontrado na literatura técnica, como citam METHA E MONTEIRO (1994), indicando a pouca influencia das fibras no módulo de elasticidade do concreto. ALTUN *et al* (2007), verificaram em seu estudo, sensíveis reduções no módulo de elasticidade dos concretos após a incorporação das fibras de aço.

Os corpos de prova com barras de 10 mm, no ensaio de arrancamento, mostraram uma carga última menor que os com barra de 16 mm, para os 3 tipos de concreto. Um dos fatores que influenciam neste resultado, é o fato de que as nervuras das barras de 16 mm são maiores que as nervuras das barras de 10 mm, criando assim regiões que trabalham como consoles, dificultando o movimento que se inicia entre a barra e o concreto, aumentando assim a aderência mecânica. Comparando os resultados para as barras de mesma bitola, corpos-de-prova de concreto autoadensável com fibras de bitola 10 mm mostraram-se 13,23%, em média mais resistentes que os de concreto autoadensável, já os de bitola 16mm mostraram-se 19,9% mais resistentes, indicando assim que as fibras tem um papel importante no aumento da aderência aço-concreto.

De uma forma geral, nenhuma barra de aço escoou ou apresentou deformações após o ensaio de arrancamento.

O Fck do concreto esta diretamente ligado a aderência armadura-concreto , resultado este que foi comprovado no ensaio de arrancamento onde a medida que a resistência do concreto cresce a tensão de aderência aumenta, confirmando o comportamento observado por de diversos autores que através da redução da porosidade da zona de transição pasta/agregado e pasta/armadura principalmente pela introdução do fíler acontece um significativo ganho de aderência

Ocorreu um incremento na tensão de aderência com o aumento da bitola da barra de aço, resultado semelhante ao encontrado por BARBOSA (2001) que afirma que se ocorresse o contrário seria pela deficiência no adensamento das peças que prejudicaria ainda mais a zona de transição, com este raciocínio então conclui-se que as peças de CAA e CAAF estavam bem adensadas

## 5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

- ✓ Fazer o ensaio de pull out para concretos autoadensáveis com diversas dosagens de fibras para analisar a variação da tensão de aderência;
  
- ✓ Estudar a aderência de CAAF variando o método de ensaio;
  
- ✓ Propor uma modelagem para o cálculo da tensão de aderência, apoiado em análises estatísticas, utilizando o *pull out test* em concretos autoadensáveis com fibras metálicas;

## Capítulo 6: Referências

ALCÂNTARA, M. A. M.; LORRAIN, M. S.; BARBOSA, M. P. Avaliação da posição da posição da armadura no desenvolvimento das tensões de aderência na interface entre o concreto auto-adensável e a armadura: volume 5 – pré-fabricados em concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46., 2004, Florianópolis. **Anais...** Editores: Padaratz, I. J.; Bittencourt, T. N. Florianópolis: IBRACON, 2004. Trabalho CBC0165, p. v.76-v.90.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. 291 f. Tese (Doutorado)–Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ARAÚJO, J. G. **Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedreira nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)–Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR MN 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do toco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 6024**: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento escrito: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6027**: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6028**: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: concreto: determinação dos módulos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. **NBR 11578**: cimento portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

\_\_\_\_\_. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 15539**: fibras de aço para concreto: especificações. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 15823-1**: concreto auto-adensável: Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco . Rio de Janeiro, 2010.

BARBOSA, M. P. et al. Concreto auto-adensável: avaliação da aderência aço-concreto através dos ensaios de determinação do coeficiente de conformação superficial das barras de aço. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 46. **Anais...** Florianópolis: IBRACON, 2004. v. 2, p. 484-497. (Trabalho CBC0167).

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência**. 2002. 203 f. Tese (Doutorado) – COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

\_\_\_\_\_. Análise comparativa e crítica de diversos modelos numéricos aplicáveis ao estudo da aderência aço-concreto. In: JORNADAS SULAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 31., 2001, Mendoza. **Anais...** Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo, 2001.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – CTEC-Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.

\_\_\_\_\_. **Estudo das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável**. 2006. 137 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – CTEC-Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. London: Elsevier Applied Science. 1990.

BILBERG, P. **Self-compact concrete for civil engineer structures: the swedish experience**. Stockholm: S.C.C.R.I., 1999.

CATELLI, J. **Determinação de propriedades mecânicas de concreto com fibras de aço**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1998.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuições ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos especiais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – CTEC-Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CHANVILLARD, G; AÏTCINT, P. C. Pull-out behaviour of corrugated steel fibers. **Advacend Cement Based Materials**, v. 4, p. 28-41, 1996.

CHANVILLARD, G. ; AITCIN, P.-C. ; LUPIEN, C. Field evaluation of steel fiber reinforced concrete overlay with various bonding mechanisms. **Transportation Research Board**, n. 1226, p. 48-56, 1989.

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

DUMÊT, T. B.; LIBÂNIO. Aderencia de cordoalhas pré-tracionadas de concreto com e sem fibras de aço. **Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos**, v. 9, n. 39, p. 21-43, 2007

ELIGEHAUSEN, R.; POPOV, E. P.; BERTERO, V. V. **Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitation**. Berkeley: University of California, 1983. 162p. Report no UCB/EERC- 83/23.

EVANGELISTA, L. M. **Betão reforçado com fibras de aço**: aplicação em pavimentos industriais. Porto: Construlink Press, 2003. v. 11.

FERGUSON, P. M. **Reinforced concrete fundamentals**. 4<sup>th</sup> edition. New York: John Wiley & Sons, 1979. 724 p. ISBN: 0-471-01459-1.

\_\_\_\_\_; BREEN, J. E.; THOMPSON, J. N. Pull-out test on high strength reinforced bars. **Journal of ACI**, v. 62, n. 55, p. 933-950, Aug. 1965.

FERNANDES, R. M. **A influencia das ações repetidas na aderência aço-concreto**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Escola de Engenharia de **São Carlos**, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

FERRARA, L.; PARK, Y. D.; SHAH, S. P. A method for mix-design of fiberreinforced self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 37. p. 957-971, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. São Paulo: EPUSP, 2000. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/260)

FIGUEIREDO, A. D. ; CECCATO, M. R. ; TORNERI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. In: REUNIÃO DO IBRACON – INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO, 39, 1997, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 1997. p. 347-356.

FUSCO, P. B. **Estruturas de concreto**: solicitações normais. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1975. 464 p.

GOMES, P. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2002.

GOMES, P. C.; BARROS, A. R. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. São Paulo. Ed. PINI, 2009.

GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. C. High strength self compacting fibre reinforced concrete: behavior in the fresh and hardened state. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH / HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 6<sup>th</sup> 2002, Leipzig. **Proceedings...** Ed. Köning, G. et al. Leipzig: Leipzig University, 2002. p. 977-990. ISBN: 3-934178-18-9.

HARAJLI, M.H (1995). **Effect of fibers on the punching shear strength of slab-column connections**. Cement & Concrete Composites, v.17, pg.161-170.

HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI; Brasília, DF: SENAI, 1993, 349 p.

HOLSCHEMACHER, K.; KLOTZ, S.; WEIBE, D. Application of steel fibre reinforced concrete for timber-concrete composite constructions. **LACER**, n. 7, p. 161-170, 2002.

JAAFAR, Rachid K. – **Bond in Reinforced Concrete**. Dissertação de mestrado, University of Cambridge, Department of Engineering, Cambridge 2000.

JARAMILLO, C.A.A. et al. Reduced of self-consolidating concrete made with various admixture combinations. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3<sup>st</sup>, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** Ed. by: Wallevik, O; Nielsson, I. Bagnex: RILEM, 2003, p. 240-250.

JOHNSTON, C. D. Fiber-reinforced concrete applications in Alberta. In: UNIVERSITY-INDUSTRY WORKSHOP ON FIBER REINFORCED CONCRETE AND OTHER ADVANCED MATERIALS, 2., 1995, Toronto. **Proceedings...** Toronto, 1995. p.87-100.

\_\_\_\_\_. Steel fiber reinforced concrete pavement trials. **Concrete International: design & construction**. v. 6, n. 12, p. 39-43, 1984.

KIM, J-K.; MAI, Y-W. (1998) **Engineered interfaces in fiber reinforced composites**. Elsevier Science Ltd. 1<sup>st</sup> Ed. Oxford, U.K. ISBN 0-08-042695-6.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. **Construções de concreto**: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

LISBOA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – CTEC-Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

MARANGON, E. **Desenvolvimento e caracterização de concretos autoadensáveis reforçados com fibras de aço**. 2006. 142 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedade e materiais. São Paulo: PINI, 1994.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos**. 2006. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia)–Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

OKAMURA, H. Self-compacting high-performance concrete. **International Concrete**, v. 19, n. 7. p. 50-54, 1997.

\_\_\_\_\_.; OUCHI, M. Self-compact concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n.1, p. 1-15, Apr. 2003.

\_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. **Self-compacting concrete. Development, present use**

**and future**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stockholm. **Proceedings...** Ed. by: Skarendhal, A.; Petersson **Proceedings...** Cachan Cedex: RILEM, 1999, p.3-14.

OLIVEIRA, S. L. **Taxa de armadura longitudinal mínima em vigas de concreto de alta resistência com fibras de aço**. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – COPPE-Instituto Alberto Luiz Coimbra, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PEREIRA, E. N.; BARROS, J. A.; CAMÕES, A. Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: experimental research and numerical simulation. 8. ed. **Journal of Materials in Civil Engineering** , v. 134, n. 8, p. 1310-1321, 2008.

REIS, A. P. A. **Reforço de vigas de concreto armado submetidas à pré-carregamento e ações de longa duração com aplicação de concretos de alta resistência e concretos com fibras de aço**. 2003. 355 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.

RILEM-CEB-FIP. **Bond test for reinforced steel**: 1-Beam test (7-II-28 D). 2- Pull Out Test (7-II-128): Tentative recommendations. **RILEM Journal Materials and Structures**, v. 6, n. 32, Mar./Apr., p. 96-105.1973.

RILEM-CEB-FIP. **Bond test for reinforced steel**: 1. Beam test. Paris: Concret Reinforcements Technology, 1983.

ROTS, J. G. Bond of reinforcement. In: ELFGREN, L. (Ed.) **Fracture mechanics of concrete structures: from theory to applications**. Report of the Technical Committee 90-FMA Fracture Mechanics to Concrete – Applications, RILEM,

Chapman and Hall : St. Edmund Press, 1989. cap. 12, p. 245-262. ISBN: 0-412-30680-8.

SORETZ, S.; HOLZENBEIN, H. Influence of rib dimensions on reinforcing bars on bond and bendability. **ACI Journal Proceedings**, Michigan, v. 76, n. 1, p. 111-128, Jan. 1979.

SOROUSHIAN, P. et al. Bond of deformed bars to concrete: effects of confinement and strength of concrete. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 88, n. 3, p. 227-232., May/Jun. 1989. ISSN: 0889-325X

Tepfers, R., 1979, “**Cracking of Concrete Cover Along Anchored Deformed Reinforcing Bars**,” Magazine of Concrete Research, V. 31, No. 106, Mar., pp. 3-12.

TORRIJOS, M. C.; BARRAGÁN, B. E.; ZERBINO, R. L. Physico-mechanical properties, and mesostructure of plain and fibre reinforced self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. v. 22, n. 8, p. 1780-1788, Aug. 2008.

TVIKSTA, L. End product. In: **Brite EuRam Program**: rational production and improved working environment through using self-compacting concrete. 2000. Task 9.

VENDRUSCOLO, M. A. **Estudo do comportamento de materiais compósitos fibrosos para aplicação como reforço de base de fundações superficiais**. 2003. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2003.

VICTOR, J. R. et al. Reduced models test for the characterization of the reologic properties of the self – compacting concrete (SCC) “; Rilem Special Publication, SARL, REYKJAVIK, Islandia, V. PRO33, p-240 – 250, 2003.

WEILER, B.; GROSSE, C. Pullout behaviour of fibers in steel fiber reinforced concrete. **Otto-Graf-Journal Stuttgart**, v. 7, p.116-127, 1996.