



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS I - CAMPINA GRANDE

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS METÁLICAS NO COMPORTAMENTO DA
ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Bruna Barbosa de Souza

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Simplicio

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO DE 2017

BRUNA BARBOSA DE SOUZA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS METÁLICAS NO COMPORTAMENTO DA
ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado ao Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Campina Grande como
requisito obrigatório para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Simplício

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO DE 2017

BRUNA BARBOSA DE SOUZA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE FIBRAS METÁLICAS NO COMPORTAMENTO DA
ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande como requisito obrigatório para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação do Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Simplício.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 05/09/2017

BANCA EXAMINADORA:

(Assinatura): _____

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Simplício

(Orientador)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho

(Examinador interno)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Prof. Dr. José Bezerra da Silva

(Examinador externo)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

DEDICATÓRIA

À minha amada mãe, por seu amor sem limites, sua dedicação exclusiva, seu exemplo inquestionável, e por ser a primeira a acreditar que meus sonhos poderiam tornar-se realidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, o maior de todos os engenheiros, por ter me dado a vida, coragem e perseverança para não desistir de meus objetivos diante de tantas dificuldades encontradas durante esta trajetória tão sinuosa.

Ao orientador deste trabalho, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Simplício, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho, examinador interno, pelas sugestões para enriquecimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Bezerra da Silva, examinador externo, por sua disponibilidade e suas observações, que em muito contribuíram para a finalização desta pesquisa.

A todos os professores que, durante estes cinco anos de formação, compartilharam comigo ferramentas de conhecimento, se tornando pontes de ensinamentos.

À minha família, mãe, pai, avós, tia e prima, os quais tanto amo, que sempre fizeram tudo por mim, alicerces de princípios e valores indispensáveis nesta trajetória, sem os quais nenhuma conquista teria o mesmo significado.

Ao meu namorado, José Rangel, pelo amor, companheirismo, apoio e grande incentivo durante esta trajetória, me dando força para continuar sempre em busca dos meus objetivos.

A todos os meus amigos, que me ensinaram as lições da escola da vida e as lições acadêmicas, em especial minha amiga Yana de Medeiros, com quem compartilhei o dia a dia dessa vivência.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção, Edvaldo Pinheiro e Conrado Pereira, pelo suporte para a realização dos ensaios.

Ao Engenheiro Aldo Camboim, por contribuir com os materiais necessários ao programa experimental deste trabalho, e ao ajudante Dorgival, por todo o auxílio nos dias de concretagem.

RESUMO

Para que o concreto armado desempenhe papel estrutural é necessário que exista adequada transferência de tensões e compatibilidade de deformações entre o aço e concreto. A aderência é o fenômeno que garante essa solidariedade entre os dois materiais e seu comportamento é influenciado por inúmeros fatores, desde aqueles relacionados aos componentes fundamentais do material, como a resistência do concreto e o diâmetro da barra, até as variáveis cujas utilizações não são imprescindíveis para sua mobilização, como a utilização de fibras metálicas no compósito. Desse modo, buscou-se, no presente trabalho, estudar o comportamento da aderência entre barras de aço e concretos de alta resistência com adição de fibras de aço. Para isso, foram desenvolvidos ensaios de *push-out* utilizando corpos-de-prova prismáticos, com 20 cm de aresta, transpassados por barras de aço nervuradas com diferentes diâmetros (10, 12,5 e 16 mm), e produzidos com concreto dosado para resistência de 60 MPa aos 28 dias. Foi adotado comprimento aderente igual a 2,5 vezes o diâmetro da barra e os ensaios foram realizados aos 21 dias. As fibras metálicas utilizadas possuíam comprimento de 60 mm no teor volumétrico de 0 e 0,75%. Os resultados experimentais demonstraram que a incorporação de fibras metálicas ao concreto resultou em aumento na tensão máxima de aderência, e esse incremento se tornava mais significativo quando se diminuía o diâmetro da barra. Ficou evidenciado também que os valores teóricos obtidos à luz da ABNT NBR 6118:2014 subestimam a tensão máxima de aderência em concretos de alto desempenho.

Palavras-chave: Aderência. Concreto de alto desempenho. Concreto com fibras.

ABSTRACT

To be possible for reinforced concrete to play structural role, there must be adequate stress transfer and strain compatibility between steel and concrete. Bond is the phenomenon that provides this solidarity between this two materials and its behavior is influenced by numerous factors, from those related to the fundamental components of the material, such as concrete strength and bar diameter, to variables whose uses are not essential for its mobilization, as the use of steel fibers in the composite. The aim of this work is to study the behavior of bond between steel bars and high strength concrete with the addition of steel fibers. For this purpose, a push-out test was developed using cubic specimens with 20 cm of edge, pierced by ribbed steel bars with different diameters (10, 12.5 and 16 mm), and produced with concrete with 60 MPa of compressive strength at 28 days. Bond length equal to 2.5 times the bar diameter was adopted and the tests were performed at 21 days. The steel fibers employed had a length of 60 mm in the volumetric ratio ranging from 0 to 0.75%. The experimental results demonstrated that the incorporation of steel fibers in the concrete leads an increase in the maximum bond strength, and this increase became more significant when the bar diameter was reduced. It was also evidenced that the theoretical values obtained with the expressions of NBR 6118:2014 underestimate the maximum bond strength in high performance concretes.

Keywords: Bond. High performance concrete. Fiber Reinforced Concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propriedades de compósitos cimentícios com adição de fibras de aço e de polipropileno	5
Figura 2 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto	7
Figura 3 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b)	8
Figura 4 - Gráfico Fator de eficiência (η) versus Razão entre o comprimento da fibra (l) e seu comprimento crítico (l_c)	11
Figura 5 - Modelo de distribuição de tensões na seção transversal de um elemento reforçado com fibras durante a flexão	12
Figura 6 - Compósitos reforçados com volume de fibras (VF) abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão	13
Figura 7 - Aderência por adesão	15
Figura 8 - Aderência por atrito	16
Figura 9 - Aderência mecânica	17
Figura 10 - Fissuração por tração	18
Figura 11 - Representação gráfica para as rupturas por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)	19
Figura 12 - Transferência de esforços por aderência	20
Figura 13 - Fendilhamento longitudinal do concreto	21
Figura 14 - Condições para o deslizamento da barra de aço	21
Figura 15 - Formas de ruptura por fendilhamento	23
Figura 16 - Distribuição de tensões de aderência	24
Figura 17 - Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais, devido à segregação e acumulação de água	25
Figura 18 - Representação esquemática de ensaios de arrancamento de barras retas em diferentes posições por ocasião da concretagem	26
Figura 19 - Superfície relativa da nervura	29
Figura 20 - Desenho esquemático com os termos da expressão da área relativa das nervuras	30
Figura 21 - Dimensões do corpo-de-prova do ensaio de (RILEM RC5, 1982)	35
Figura 22 - Representação esquemática dos corpos-de-prova para ensaio de duplo arrancamento (a) e quatro barras (b)	36

Figura 23 - Posição da amostra para o ensaio push-out em AAC.....	37
Figura 24 - Esquema e foto do corpo-de-prova e do método de ensaio push-out.....	37
Figura 25 – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out test (cm).	38
Figura 26 - Ensaio de viga tipo A	39
Figura 27 - Ensaio de viga tipo B	39
Figura 28 - Ensaio de extremidade de viga	40
Figura 29 - Ensaio de tirante (dimensões em mm).....	41
Figura 30 - Granulometria da areia e brita utilizadas.....	46
Figura 31 - Fibra Dramix RC 65/60 - BN	47
Figura 32 - Geometria das fibras.....	48
Figura 33 - Dimensão dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out test (cm)	49
Figura 34 - Barra de aço posicionada no interior da forma	50
Figura 35 - Ensaio do abatimento do tronco de cone.....	51
Figura 36 - Formas antes do preenchimento com concreto	52
Figura 37 - Corpos-de-prova logo após sua concretagem	52
Figura 38 - Corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão	53
Figura 39 - Corpos-de-prova prismáticos logo após desmoldagem	53
Figura 40 - Ensaio de resistência à compressão.....	54
Figura 41 - Realização do ensaio push-out.....	55
Figura 42 - Corpos-de-prova após ruptura: sem fibra à esquerda e com fibra à direita.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classes de resistências de concretos estruturais (MPa).	4
Tabela 2 - Quantidades de corpos de prova por tipo de concreto e ensaio	45
Tabela 3 - Composição do concreto utilizado.....	45
Tabela 4 - Caracterização dos agregados	47
Tabela 5 - Características geométricas das barras	48
Tabela 6 - Resistências médias à compressão dos concretos estudados	56
Tabela 7 - Valores de cobrimento utilizados.....	58
Tabela 8 - Valores de tensão máxima de aderência dos concretos produzidos.....	58
Tabela 9 - Valores experimentais e teóricos (NBR 6118) de tensão máxima de aderência.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CRFA	Concreto Reforçado com Fibra de Aço
CAD	Concreto de Alto Desempenho
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AAC	Concreto Celular Autoclavado
CP	Corpo-de-prova
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
LEMC	Laboratório de Estrutura e Materiais de Construção
NBR	Norma Brasileira Registrada
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages

LISTA DE SÍMBOLOS

l_c	comprimento crítico da fibra
σ_{fu}	resistência limite da fibra
T_{fu}	tensão limite de cisalhamento por atrito
r	raio da seção transversal da fibra
$d_{m\acute{a}x}$	diâmetro máximo do agregado
f_r	área relativa da nervura
f_{bd}	resistência de aderência de cálculo da armadura passiva
η	Coefficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva
f_{ctd}	Resistência à tração de cálculo do concreto
$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração característica inferior do concreto
$f_{ct,m}$	Resistência média do concreto à tração
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
$f_{c21, CF}$	resistência média à compressão dos concretos com fibras aos 21 dias
$f_{c21, SF}$	resistência média à compressão dos concretos sem fibras aos 21 dias
c	recobrimento
ϕ	diâmetro da barra
$T_{max,CF}$	tensão máxima de aderência dos concretos com fibras
$T_{max,SF}$	tensão máxima de aderência dos concretos sem fibras
L_d	comprimento de aderência
$T_{max, 3\phi}$	tensão máxima de aderência para comprimento de aderência igual a 3 vezes o diâmetro
$T_{max,2,5\phi}$	tensão máxima de aderência para comprimento de aderência igual a 2,5 vezes o diâmetro
f_{cm}	resistência média à compressão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1	Concreto de Alto Desempenho	3
2.1.1	Classificação em termos de resistência.....	4
2.2	Concreto Reforçado com Fibra (CRF).....	5
2.2.1	Fibras de Aço.....	6
2.2.2	Mecanismo de ação das fibras de aço	7
2.2.3	Eficiência das fibras	8
2.2.3.1	Comprimento.....	9
2.2.3.2	Orientação das fibras no compósito.....	10
2.2.3.3	Volume.....	11
2.3	Concreto Armado e Aderência	13
2.3.1	Tensão de Aderência.....	14
2.3.2	Tipos de Aderência.....	15
2.3.2.1	Aderência por adesão	15
2.3.2.2	Aderência por atrito	16
2.3.2.3	Aderência mecânica.....	16
2.3.3	Fissuração e esforços mobilizados pela aderência	17
2.3.4	Modos de ruptura da aderência	18
2.3.5	Parâmetros que influenciam na aderência	22
2.3.5.1	Características estruturais.....	22
2.3.5.2	Propriedades das barras	28

2.3.5.3	Propriedades do concreto	31
2.3.6	Ensaio de Aderência.....	34
2.3.6.1	Ensaio de Arrancamento Simples (Pull-Out Test).....	34
2.3.6.2	<i>Push-out test</i>	36
2.3.6.3	Ensaio de Viga (<i>Beam Test</i>).....	38
2.3.6.4	Ensaio de extremo de viga (<i>Beam End Test</i>).....	40
2.3.6.5	Ensaio de tração direta	40
2.3.7	Resistência de aderência segundo a NBR 6118	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Materiais.....	45
3.1.1	Concreto	45
3.1.2	Fibras de aço	47
3.1.3	Barras de aço	48
3.2	Métodos	48
3.2.1	Confecção dos corpos-de-prova.....	48
3.2.2	Ensaio de resistência à compressão	54
3.2.3	Ensaio de <i>push-out</i>	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4.1	Resistência à Compressão	56
4.2	Tensão de Aderência	57
4.2.1	Efeito do confinamento do concreto	57
4.2.2	Efeito da presença de fibras	58
4.2.3	Efeito do diâmetro das barras.....	59
4.2.4	Comparação com valores teóricos (NBR 6118)	59
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
5.1	Conclusões	61
5.1.1	Influência das fibras na resistência à compressão dos concretos	61

5.1.2	Efeito das fibras na tensão máxima de aderência	62
5.1.3	Efeito do diâmetro da barra na tensão máxima de aderência	62
5.1.4	Comparação dos valores experimentais com valores teóricos	62
5.2	Sugestões para pesquisas futuras	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

O concreto é, certamente, o material estrutural mais empregado no mundo e isso se deve ao fato do mesmo possuir baixo custo e possibilitar a fabricação de infinitos formatos de peças. Porém, o concreto simples apresenta características de material frágil, quebradiço, com baixa resistência e baixa capacidade de alongamento devido à tração. Após sua fissuração, toda a capacidade de resistir aos esforços de tração é perdida, fenômeno que ocasionou soluções tecnológicas como o concreto armado, onde barras de aço são inseridas nas peças de concreto simples a fim de absorver os esforços de tração solicitantes. Recentemente, estudos sobre a adição de fibras ao concreto têm sido realizados com a intenção de elucidar o comportamento mecânico do material resultante dessa combinação.

A ação das fibras se dá por meio da retardação do surgimento de fissuras e inibição de suas propagações, prevenindo a ocorrência de ruptura brusca. Distribuídas de forma aleatória no interior do concreto, as fibras “costuram” as fissuras originadas devido à ação de carregamentos externos, mudanças de temperatura e umidade, dentre outros fatores.

Aplicações do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA) se estendem de peças estruturais a não estruturais, podendo ser utilizado em estruturas hidráulicas, como barragens e vertedouros, em pavimentos de aeroportos, rodovias e pontes, revestimentos de túneis, etc.

Já no que tange aos concretos de alta resistência, sua utilização ainda é limitada e quase que restrita às construções experimentais e obras específicas, como pontes, estruturas marítimas e edifícios de grandes alturas, especialmente em países desenvolvidos. A ABNT NBR 6118:2014, em sua última correção, incorporou concretos com classe de resistências superiores a 50 MPa, sinalizando que a aplicação de concretos de alto desempenho tende a ser mais frequente como

resposta à necessidade de estruturas cada vez mais duráveis e com melhor desempenho (SANTANA, 2014).

A aderência concreto-aço é uma das propriedades que sofre a influência da resistência à compressão do concreto e da presença de fibras. Embora exaustivos estudos já tenham sido desenvolvidos, objetivando estudar esta propriedade em concretos convencionais, lacunas ainda precisam ser preenchidas quando se trata de concretos não convencionais. O fenômeno da aderência é responsável por transferir os esforços entre o aço e o concreto, compatibilizando as deformações de ambos os materiais e possibilitando o uso estrutural do concreto armado (SANTANA, 2014).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a influência da adição de fibras de aço no comportamento da aderência entre barras de aço e concreto de alto desempenho.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Verificar os efeitos da influência da adição de fibras na resistência à compressão do compósito;
- Analisar, comparativamente, o comportamento da aderência entre barras de aço e concreto com e sem adição de fibras;
- Analisar o efeito do diâmetro da barra na tensão máxima de aderência;
- Comparar os resultados dos ensaios de *push-out* com os valores teóricos, obtidos pela expressão da ABNT NBR 6118:2014.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão descritos estudos bibliográficos fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, tais como Concreto de Alto Desempenho, Concreto Reforçado com Fibra e Aderência.

2.1 Concreto de Alto Desempenho

O concreto de alto desempenho (CAD) é obtido através da utilização de dois tipos de aditivos, minerais e químicos, que modificam a microestrutura da pasta de concreto e da interface agregado-pasta (BORGES, 2002).

Os aditivos minerais atuam, fisicamente, através do efeito filler, ocupando os vazios da massa de concreto e quimicamente, transformando o hidróxido de cálcio em silicato de cálcio hidratado, o que recebe o nome de reação pozolânica. A adição resulta em um incremento na resistência mecânica e na durabilidade do concreto através da diminuição da porosidade e, por consequência, de sua permeabilidade. Essa melhora é também resultado do aumento da fração de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que é um composto aderente, além de ser responsável pela resistência mecânica de concretos e argamassas. Os aditivos químicos como os superplastificantes, reduzem a porosidade da massa de concreto através da diminuição do fator a/c , resultando em aumento de durabilidade e resistência (BORGES, 2002).

Contudo, algumas preocupações acerca do uso desse material surgem relacionadas ao aumento da fragilidade do material com o aumento da resistência, como também do surgimento de fissuras com faces mais lisas. Grande parte dos projetos envolvendo esforços cortantes são, atualmente, baseados em dados experimentais com elementos que apresentam resistência à compressão inferior aos valores que caracterizam o CAD. É de conhecimento que um dos mecanismos para a transferência dos esforços de cisalhamento é o atrito entre as faces da fissura, que precisa então ser melhor avaliado para a utilização dessa tecnologia. Entre as

soluções para esse comportamento frágil está proporcionar maior ductilidade às peças fabricadas com CAD através do adequado dimensionamento e detalhamento das armaduras, podendo-se considerar a adição ou substituição por fibra de aço na mistura do concreto (HADADE, 2008).

2.1.1 Classificação em termos de resistência

Ainda que o aumento na resistência à compressão não seja o único benefício proporcionado pela utilização do CAD, quando comparado a concretos convencionais, é comum a utilização deste parâmetro como fundamento mais relevante. Isso se deve ao fato de existirem mais esclarecimentos sobre a relação entre a composição do concreto e sua resistência à compressão, do que da influência da estrutura do concreto em suas demais características (SHAH, 1997).

A classificação do CAD em termo de sua resistência ao cisalhamento tem se modificado com o passar dos anos. A Tabela 1 mostra a classificação apresentada na ABNT NBR 8953: 2015, que estabelece as classes de concreto em função da resistência à compressão axial.

Tabela 1 – Classes de resistências de concretos estruturais (MPa).

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

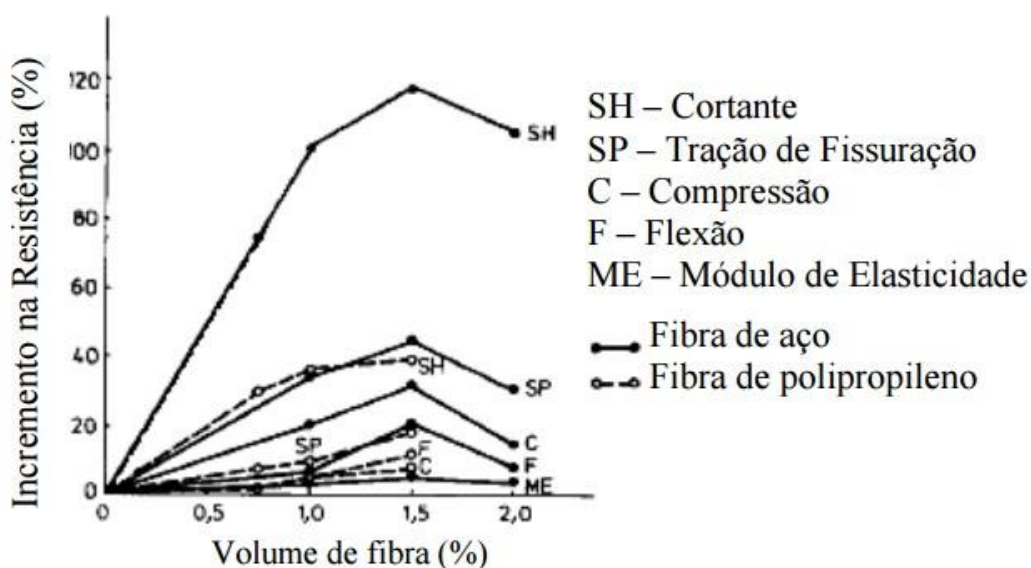
Fonte: ABNT NBR 8953 (2015)

2.2 Concreto Reforçado com Fibra (CRF)

O ACI 544.1R (2004) define o concreto reforçado com fibra (CRF) como sendo um composto obtido pela união de cimentos hidráulicos a agregados e fibras discretas, onde estas últimas podem ser produzidas a partir do aço, vidro, polímeros orgânicos ou ainda serem de origem natural ou vegetal.

Além do tipo de fibra, outras características podem influenciar nas propriedades dos compósitos cimentícios, entre elas a geometria, a fração volumétrica, a disposição das fibras, a aderência da fibra na matriz e os métodos produtivos (RESENDE, 2003). A Figura 1 retrata um exemplo do incremento nos valores de resistência à compressão, tração de fissuração, flexão, cortante e módulo de elasticidade, para fibras de aço e de polipropileno, em diferentes teores.

Figura 1 - Propriedades de compósitos cimentícios com adição de fibras de aço e de polipropileno



Fonte: Adaptado de Walton (1975)

Em particular, as fibras de aço apresentam boa interface fibra/matriz, melhoram a resistência do concreto na pós-fissuração e possuem módulo de elasticidade superior ao apresentado pela matriz cimentícia (RESENDE, 2003). De forma particular, as fibras de aço destinadas ao reforço do concreto são definidas como comprimentos curtos e discretos de aço, apresentando relação



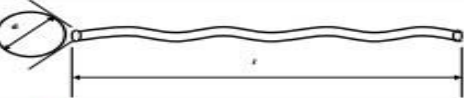
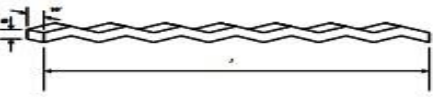
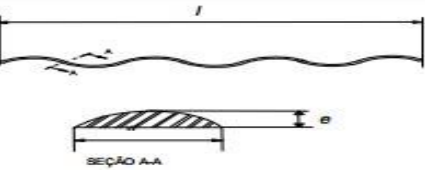
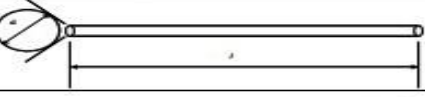
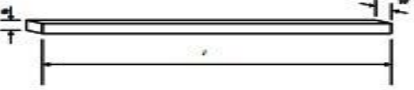
comprimento/diâmetro de cerca de 20 a 100, apresentando tamanho suficientemente pequeno para que sua dispersão aleatória na mistura de concreto seja possibilitada por meio de procedimentos habituais.

2.2.1 Fibras de Aço

Figueiredo (2000) lista os três principais tipos de fibras de aço que podem ser encontrados no mercado brasileiro. O primeiro deles é produzido da sobra do processo de fabricação da lâ de aço, com comprimento variando entre 25mm e 50mm e recebe o nome de fibra de aço corrugada devido sua conformação longitudinal. O formato corrugado objetiva aumentar a aderência entre a fibra e a matriz de concreto. O segundo tipo foi criado especificamente para atuar como reforço do concreto, apresentando ancoragem em gancho e seção retangular, sendo produzido a partir de chapas de aço. Já o terceiro tipo de fibras diferencia-se do segundo apenas pelo formato circular de sua seção transversal. Sua fabricação é feita trefilando-se fios de forma progressiva até que seja atingindo o diâmetro desejado para a fibra, fenômeno que acaba por endurecer e aumentar a resistência do metal.

No ano de 2007, a ABNT lançou a norma NBR 15530:07, a primeira sobre fibras de aço, que recebeu o nome de “Fibras de aço para concreto – Especificações”. Esta norma define as especificações para classificação de fibras de aço com baixo teor de carbono e estabelece as condições básicas em relação à forma geométrica, dimensões e resistências à tração e ao dobramento. De acordo com a conformação geométrica, as fibras podem ser classificadas em Tipo A (fibra de aço com ancoragens nas extremidades), Tipo C (fibra de aço corrugada) e Tipo R (fibra de aço reta). Outra classificação é feita tomando por base o tipo de aço que deu origem às fibras, sendo a Classe I aquela que abrange as fibras oriundas de arame trefilado a frio, na Classe II estão as fibras provenientes de chapa laminada e a Classe III corresponde às fibras de arame trefilado e escarificado (Figura 2).

Figura 2 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Fonte: Figueiredo et al (2008).

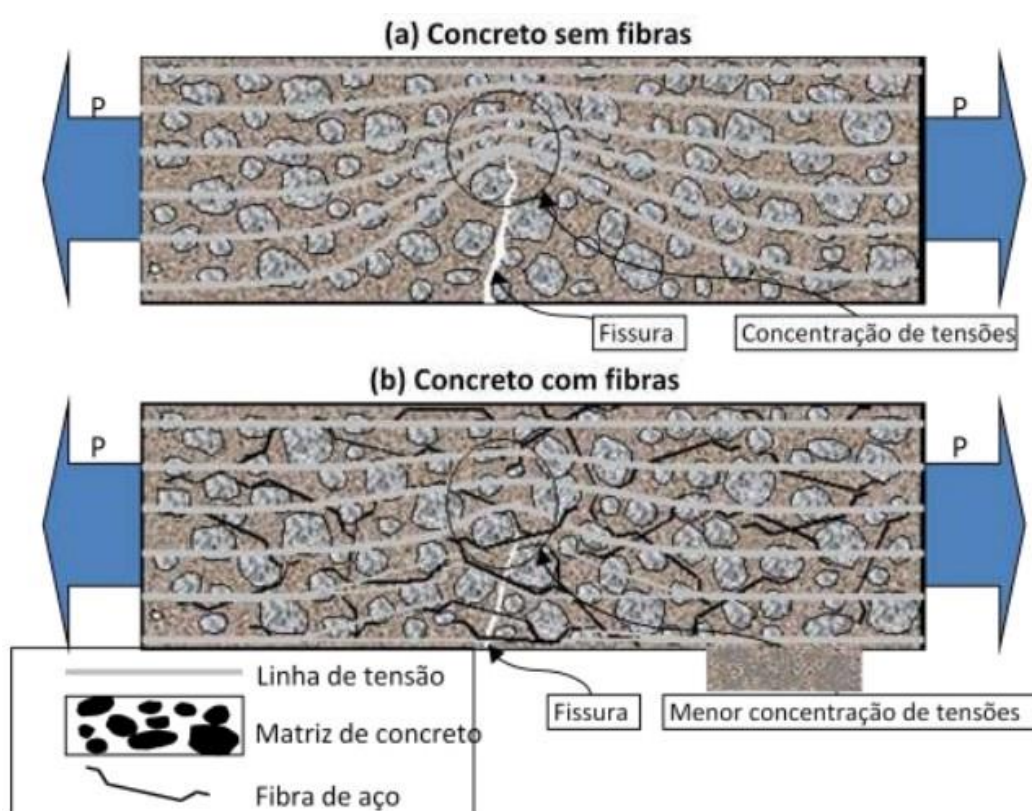
2.2.2 Mecanismo de ação das fibras de aço

Miller (2008) define a atuação das fibras no concreto como obstáculos para o controle e abertura de fissuras, podendo atuar sobre as microfissuras, aumentando a resistência do compósito, e nas microfissuras, aumentando a energia relativa à ruptura do material e, por consequência, a tenacidade e a ductilidade.

Figueiredo (2000) explica que nos concretos simples as fissuras representam obstáculos para a disseminação de tensões, causando acúmulo de tensões nos limites da fissura. Caso essa concentração de tensões seja maior que a resistência da matriz de concreto, a ruptura brusca da peça poderá ser desencadeada. Ao se adicionar fibras de aço ao concreto o mesmo deixa de apresentar característica extremamente frágil, pois as fibras agem como “pontes” que permitem a passagem

das tensões por entre as fissuras, desfavorecendo os pontos de concentração de tensões mencionados anteriormente. Como resultado tem-se uma queda na velocidade de propagação das fissuras no concreto que passa a exibir certa capacidade de carga mesmo após fissurado, sendo chamado de pseudo-dúctil (Figura 3).

Figura 3 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b)



Fonte: Figueiredo (2000)

2.2.3 Eficiência das fibras

As fibras atuam como pontes de transferência de tensões através das fissuras por alguma combinação de cisalhamento interfacial e bloqueio mecânico entre a fibra deformada e a matriz. Antes do surgimento de fissuras, a carga é suportada

tanto pela matriz quanto pelas fibras; uma vez iniciada a fissuração, as fibras suportam toda a tensão, atravessando as porções fissuradas da matriz, até que elas sejam arrancadas da matriz cimentícia ou até que seja atingida sua tensão de escoamento. Assim, as fibras são particularmente eficazes sob tensões de tração direta, flexão, cisalhamento, impacto e sob carga de fadiga. Seu desempenho é menos efetivo sob carga compressiva (BENTUR E MINDESS, 1990).

De acordo com Bentur e Mindess (1990), a eficiência das fibras pode ser analisada através do aumento na resistência e do aumento da tenacidade do compósito. Dentre os parâmetros que influenciam nessa eficiência podem ser citados o comprimento, a orientação, e o volume de fibras.

2.2.3.1 Comprimento

O comprimento da fibra tem influência direta na aderência fibra-matriz. Quanto maior for o comprimento, melhor se dará a aderência entre os dois materiais, propiciando a ruína da estrutura por escoamento da fibra, devido sua ductilidade. Por outro lado, um aumento no comprimento da fibra provocará perda na trabalhabilidade do concreto. Quanto menor for o comprimento, mais dificultada estará a transferência de tensões, fazendo com que a fibra seja arrancada da matriz antes mesmo de acontecer seu escoamento. Em ambos os casos, a tenacidade do compósito é incrementada, especialmente quando ocorre a ruptura por arrancamento da fibra (DUMÊT, 2003).

Bentur e Mindess (1990) definiram um comprimento crítico da fibra (l_c), comprimento mínimo que possibilita o escoamento da fibra de aço, como sendo a relação entre a resistência limite da fibra (σ_{fu}) e a tensão limite de cisalhamento por atrito (τ_{fu}) multiplicado pelo raio da seção transversal da fibra (r):

$$l_c = \frac{\sigma_{fu}}{\tau_{fu}} \times r \quad (1)$$

Para que se garanta a ruptura da fibra, deve-se ter $l > 2 l_c$.

Uma limitação para o emprego da expressão acima é que a mesma foi obtida através de estudos com fibras retas e lisas. Para fibras com ganchos nas

extremidades, a aderência é resultado da ancoragem mecânica dos ganchos, e não devido à tensões de cisalhamento por atrito.

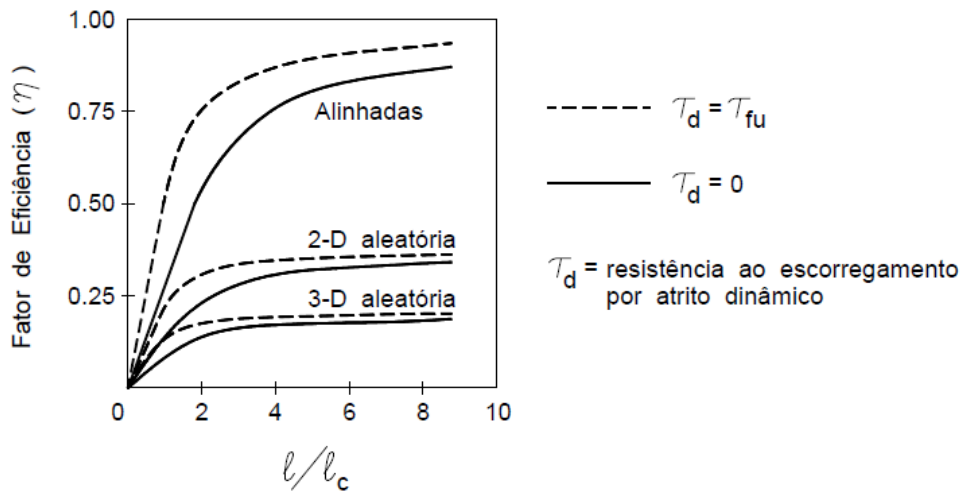
No Brasil, as fibras utilizadas geralmente variam entre 30 mm e 60 mm de comprimento. Busca-se, na prática, utilizar $l \geq 2 d_{\text{máx}}$ (diâmetro máximo do agregado) e $l/d \leq 80$, para melhor eficiência frente à fissuração, e para minimização na perda de trabalhabilidade.

2.2.3.2 Orientação das fibras no compósito

Outro fator que influencia na eficiência das fibras é a sua orientação dentro da matriz cimentícia. Deve lembrar-se que, ao examinar ou descrever os efeitos das adições de fibras, é implicitamente assumido que as fibras são uniformemente distribuídas em toda a matriz e, além disso, que são orientadas aleatoriamente. Infelizmente, provavelmente nenhuma das hipóteses seja verdadeira, pois o lançamento e vibração do material podem acarretar uma orientação preferencial das fibras (geralmente horizontal), bem como sua segregação (BENTUR E MINDESS, 1990).

De acordo com Dumêt (2003), a eficiência das fibras será maior se as mesmas estiverem alinhadas na mesma direção que os esforços. Entretanto, alinhar as fibras na posição desejada é um processo trabalhoso e caro. A Figura 4 a seguir apresenta um gráfico que relaciona o efeito combinado da orientação e do comprimento da fibra com a sua eficiência. O gráfico foi obtido através de ensaios utilizando, novamente, fibras retas e lisas.

Figura 4 - Gráfico Fator de eficiência (η) versus Razão entre o comprimento da fibra (l) e seu comprimento crítico (l_c)

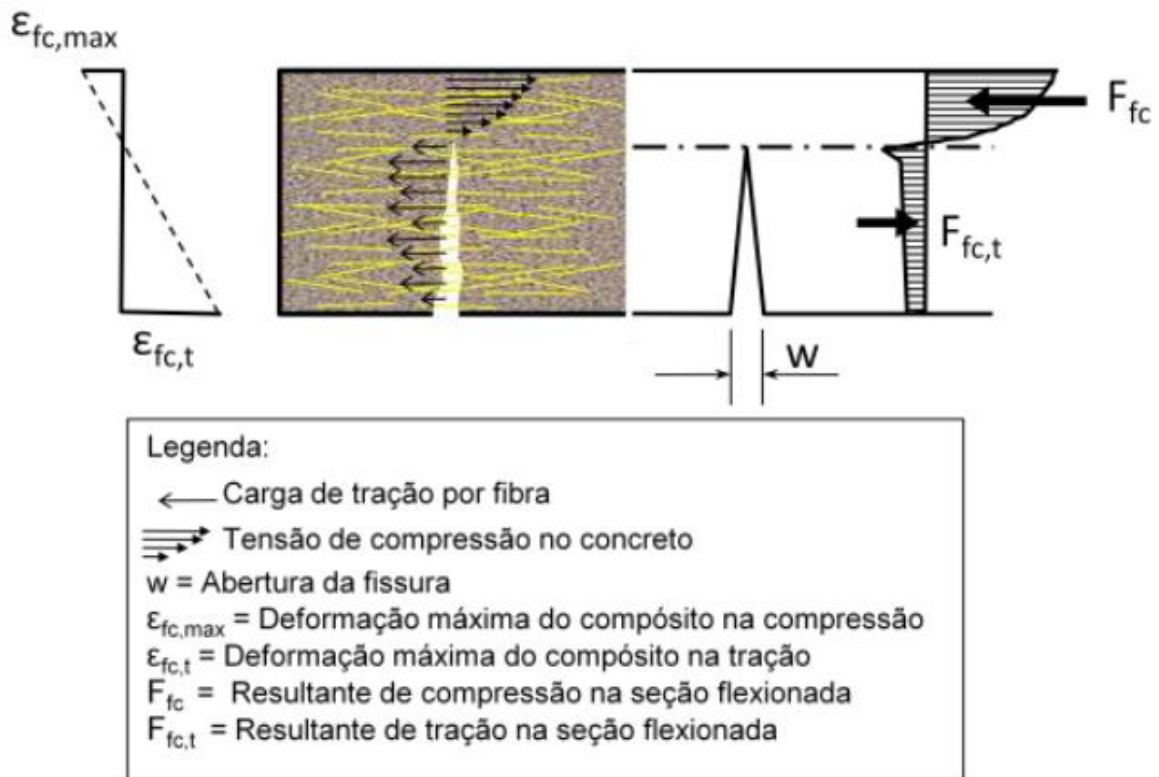


Fonte: Bentur e Mindess (1990)

2.2.3.3 Volume

De acordo com Figueiredo (2011), quanto maior o teor utilizado, maior será a quantidade de fibras agindo como ponte de transferência de tensões, aumentando o reforço do concreto após o início da fissuração. Na Figura 5, podemos visualizar uma seção fissurada de uma viga submetida à flexão, acompanhada de seu diagrama de tensões. Nota-se que a resistência à tração da seção inferior à linha neutra é a resultante de todas as cargas suportadas pelas fibras presentes. Portanto, quanto maior for a quantidade de fibras na seção, maior será essa resultante de tração, e, por consequência, a capacidade resistente do compósito.

Figura 5 - Modelo de distribuição de tensões na seção transversal de um elemento reforçado com fibras durante a flexão

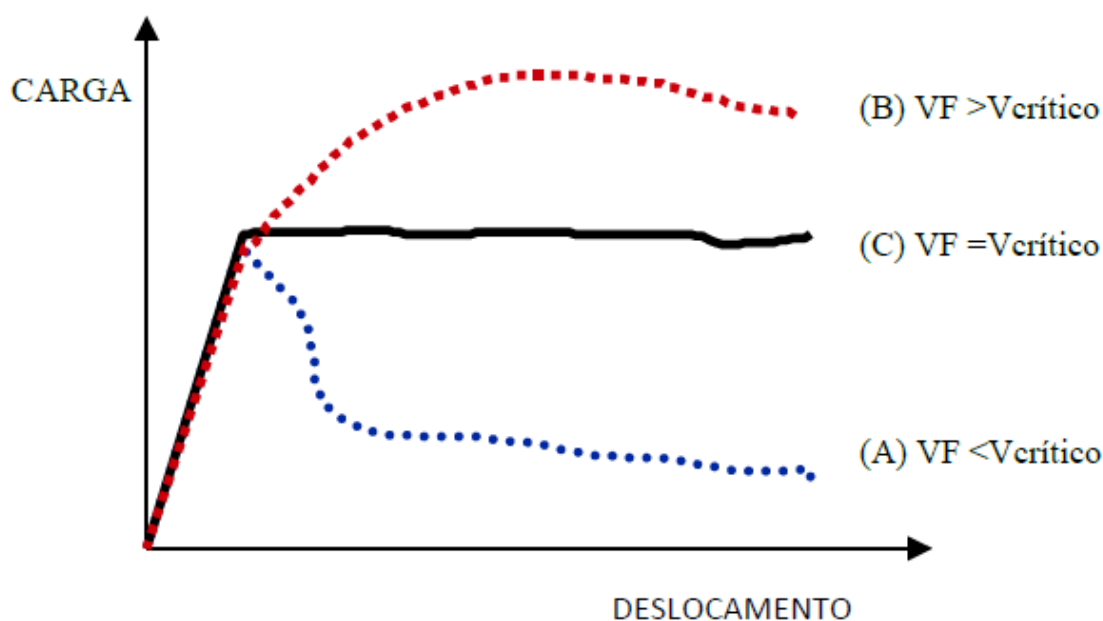


Fonte: Adaptado por Figueiredo (2011)

O consumo de fibras, na prática, é pequeno, não ultrapassando 157 kg/m^3 (2%). Essa quantidade é explicada pelo alto custo das fibras e pela perda da trabalhabilidade do compósito resultado de seu uso. O uso de superplastificantes melhora nesse último aspecto, entretanto, exige uma dosagem limite para seu uso, e quanto maior for a quantidade utilizada, mais rápido o aditivo perde seu efeito (DUMÊT, 2003).

Figueiredo (2011) cita o conceito de volume crítico como sendo o teor de fibras que, mesmo após a ruptura da matriz cimentícia, mantém a mesma capacidade resistente do compósito. Em outras palavras, abaixo do volume crítico, ocorre uma perda progressiva de resistência do compósito após a fissuração da matriz, e acima do volume crítico o compósito demonstraria um aumento na capacidade resistente na fase pós-fissuração (Figura 6).

Figura 6 - Compósitos reforçados com volume de fibras (VF) abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão



Fonte: Figueiredo (2011)

2.3 Concreto Armado e Aderência

Segundo Fusco (1995), o concreto armado é o resultado da solidariedade entre o concreto e o aço, que impede o escorregamento da armadura em relação ao concreto que a envolve, e é garantida pela existência da aderência entre esses dois materiais.

Castro (2002) afirma que o comportamento estrutural do concreto armado depende do fenômeno da aderência, que é responsável por transferir os esforços e compatibilizar as deformações de ambos elementos. Nas regiões comprimidas das peças e em suas partes não tracionadas as deformações do aço e do concreto são iguais. Em geral, nas regiões tracionadas, a aderência bloqueia o deslizamento entre as barras da armadura e a matriz de concreto, porém a ocorrência de fissuras cria zonas de descontinuidade que podem vir a possibilitar esses deslocamentos.

2.3.1 Tensão de Aderência

Santana (2014) define tensão de aderência como a relação entre a força que age em uma barra e sua correspondente superfície aderida ao concreto. Embora esse conceito seja de fácil compreensão inicial, diversos fatores podem influenciar tanto seu comportamento quanto sua quantificação.

Considera-se que uma barra de aço inserida em concreto está próxima de seu arrancamento quando a tensão atuante na interface aço-concreto, chamada de tensão última de aderência, é alcançada. Esta tensão é considerada uniforme em toda a superfície da barra, mesmo que na realidade isso não ocorra (SANTANA, 2014).

Leonhardt e Mönning (1977) citam as causas das variações de deformação em uma certa extensão das barras de aço que originam as tensões de aderência nos elementos de concreto armado. Essas causas estão listadas a seguir:

- Ações externas: modificam ambas as tensões de compressão e tração atuantes na armadura;
- Fissuras: acarretam um incremento de tensão no aço e, por consequência, das tensões de aderência;
- Forças de ancoragem nas extremidades das barras: a transferência dos esforços que agem na barra é feita por meio da tensão de aderência;
- Variações de temperatura: as barras de aço apresentam dilatação térmica maior que o concreto devido a sua maior condutibilidade. Essa diferença de dilatação é combatida pelas tensões de aderência, que podem, em casos extremos, alcançar medidas altíssimas capazes de deteriorar o cobrimento de concreto;
- Retração do concreto: provoca tração no concreto e compressão no aço; é inibida pela armadura;
- Deformação lenta do concreto em peças comprimidas: o encurtamento causado pela deformação lenta provoca um acréscimo de tensões de compressão na armadura, promovendo alívio de tensões no concreto.

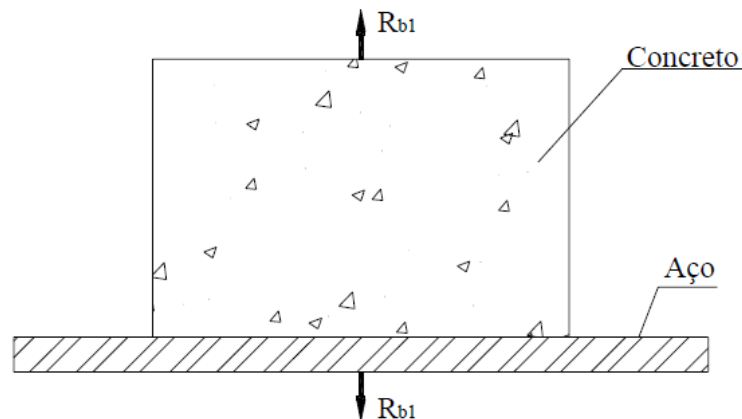
2.3.2 Tipos de Aderência

O fenômeno da aderência é proveniente de vários fenômenos que intervêm na ligação aço-concreto. Usualmente é feita a seguinte separação esquemática dos mecanismos resistentes: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica.

2.3.2.1 Aderência por adesão

É resultado das ligações físico-químicas existentes na interface dos dois materiais, aço e concreto, que surgem durante as reações de pega do concreto. Pode ser verificada pela força de adesão R_{b1} , que resiste à separação de um bloco concreto posicionado sobre uma chapa de aço, como mostra a Figura 7 (FUSCO, 1995).

Figura 7 - Aderência por adesão



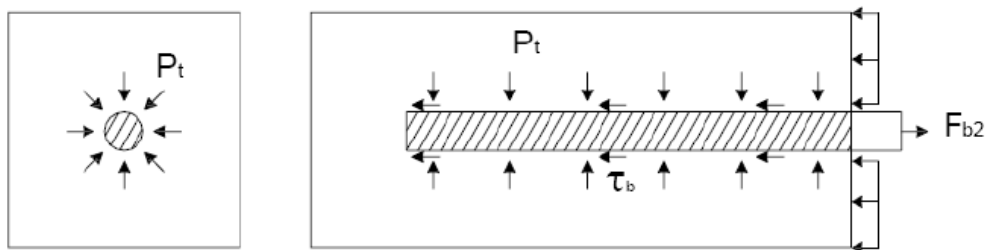
Fonte: Fusco (1995)

Essa parcela da aderência varia também de acordo com a rugosidade e com o grau de limpeza da superfície, e tem seu valor zerado após o deslocamento relativo entre os dois materiais, mesmo este sendo de pequena magnitude.

2.3.2.2 Aderência por atrito

Em ensaio de arrancamento de uma barra de aço envolta por concreto, é possível notar que a força de arrancamento é superior ao valor de R_{b1} resultante da adesão, indicando a existência de uma parcela adicional de aderência (Figura 8). Ensaio realizados mostram que essa nova fração é oriunda das forças de atrito que surgem entre os dois materiais (FUSCO, 1995).

Figura 8 - Aderência por atrito



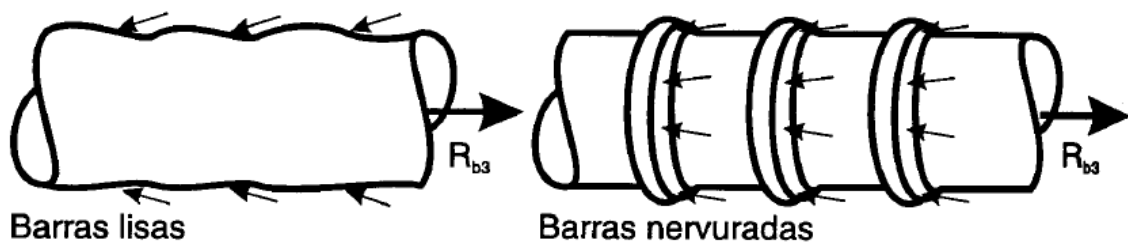
Fonte: Fusco (1995)

De acordo com Fusco (1995), o atrito gerado é dependente do coeficiente de atrito entre o aço e o concreto, que por sua vez é função da rugosidade superficial da barra, e de uma tensão normal sobre a barra resultante da retração do concreto.

2.3.2.3 Aderência mecânica

A terceira parcela que compõe a aderência é resultado da existência de saliências na superfície da barra, funcionando como peças de apoio que mobilizam tensões de compressão no concreto quando a barra é tracionada (Figura 9).

Figura 9 - Aderência mecânica



Fonte: Fusco (1995)

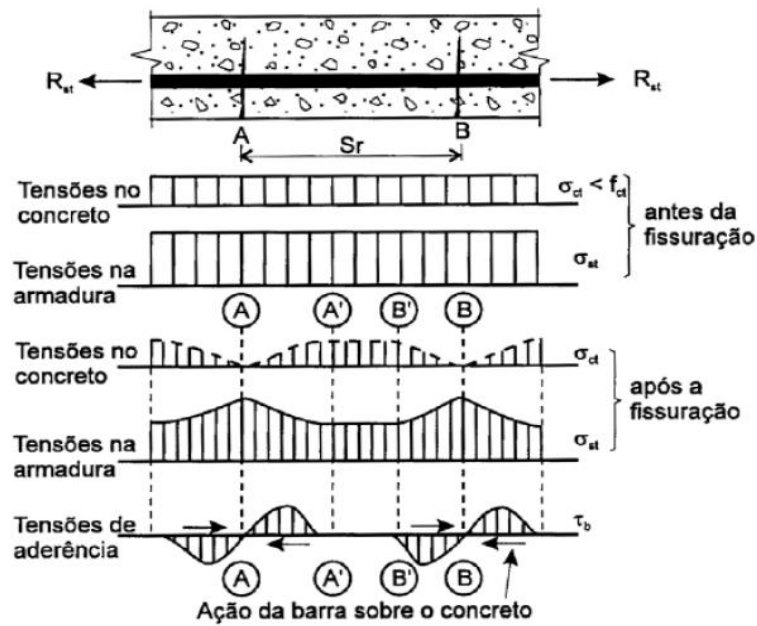
A aderência mecânica é a parte mais significativa na solidariedade entre aço e concreto em barras nervuradas, sendo suas saliências construídas propositalmente para este fim. Nas barras lisas esse efeito continua a existir, embora menos expressivo, devido a irregularidades na conformação superficial intrínseco ao processo de fabricação (FUSCO, 1995).

2.3.3 Fissuração e esforços mobilizados pela aderência

Tanto para esforços de tração quanto para de compressão, quando não fissurado, o concreto apresenta as mesmas deformações para as armaduras e para o concreto que as circunda. Iniciada a fissuração essas deformações passam a ser diferentes, o aço apresenta alongamento superior ao do concreto, o que resulta no deslizamento da armadura em relação ao concreto. Para o caso da igualdade de deformações tem-se a chamada aderência rígida, enquanto que quando os alongamentos divergem entre si dá-se o nome de aderência deslizante ou móvel (BUCHAIM, 2001).

Quando as tensões atuantes são suficientemente baixas, o concreto resiste à tração e continua sem apresentar fissuração, enquadrando-se assim no estágio I. Ao aumentar as solicitações, a tensão de ruptura do concreto à tração é atingida, iniciando-se o processo de fissuração da peça (estádio II). A partir da mudança de estágio, as seções fissuradas de concreto deixam de apresentar tensões de tração, sendo estas transferidas para o aço, como ilustra a Figura 10 (FUSCO, 1995).

Figura 10 - Fissuração por tração



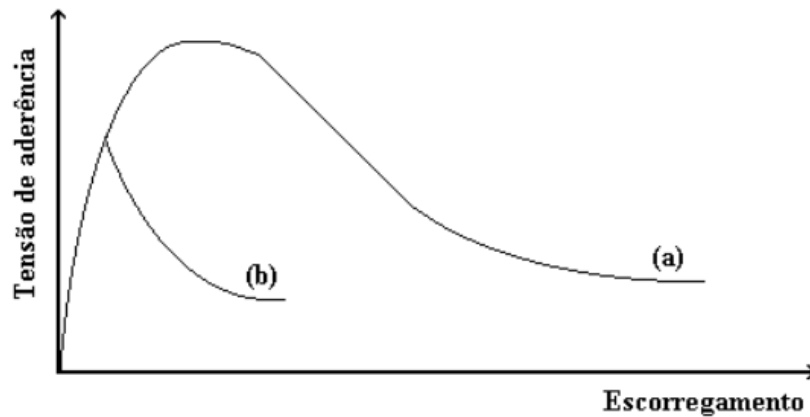
Fonte: Fusco (1995)

2.3.4 Modos de ruptura da aderência

De acordo com Dumêt (2003), vários fatores podem influenciar no tipo de ruptura que uma peça irá sofrer, dentre eles podem ser citados os tipos de armadura (barra, fio) e de conformação superficial (lisa ou nervurada), o diâmetro da barra, a presença ou não de armaduras de confinamento, o cobrimento, a tensão na armadura, as características do concreto, e a condição superficial da barra.

Dumêt (2003) cita dois modos básicos de ruptura, a ruptura por arrancamento, e a ruptura por fendilhamento, representadas na Figura 11, onde a letra (a) corresponde a arrancamento e a letra (b), a fendilhamento.

Figura 11 - Representação gráfica para as rupturas por arrancamento (a) e por fendilhamento (b)

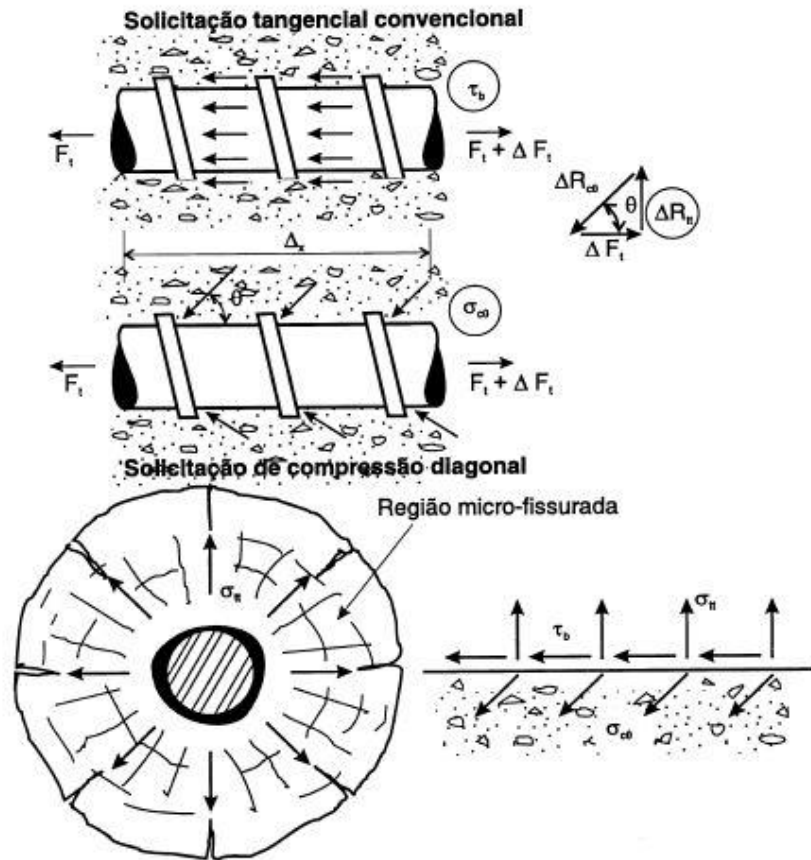


Fonte: Dumêt (2003)

Em suma, ao se solicitar uma barra, a adesão é responsável por garantir a aderência inicial, mas essa parcela deixa de existir de maneira acelerada por conta da ocorrência de pequenos deslizamentos locais ou devido à diminuição do diâmetro da barra, explicada pelo efeito de Poisson. Entram em ação posteriormente as forças de atrito, que por sua vez são reduzidas a partir do início da fissuração do concreto, restando por último a parcela mecânica da aderência (DUMÊT, 2003).

Embora se imagine inicialmente que a aderência entre o concreto e o aço aconteça por meio de tensões tangenciais na interface desses dois materiais, na realidade o que existe são tensões diagonais de compressão, que são acompanhadas por tensões diagonais de tração para que ocorra o equilíbrio (Figura 12). Esse conjunto de tensões resulta no surgimento de microfissuras no entorno da barra (FUSCO, 1995).

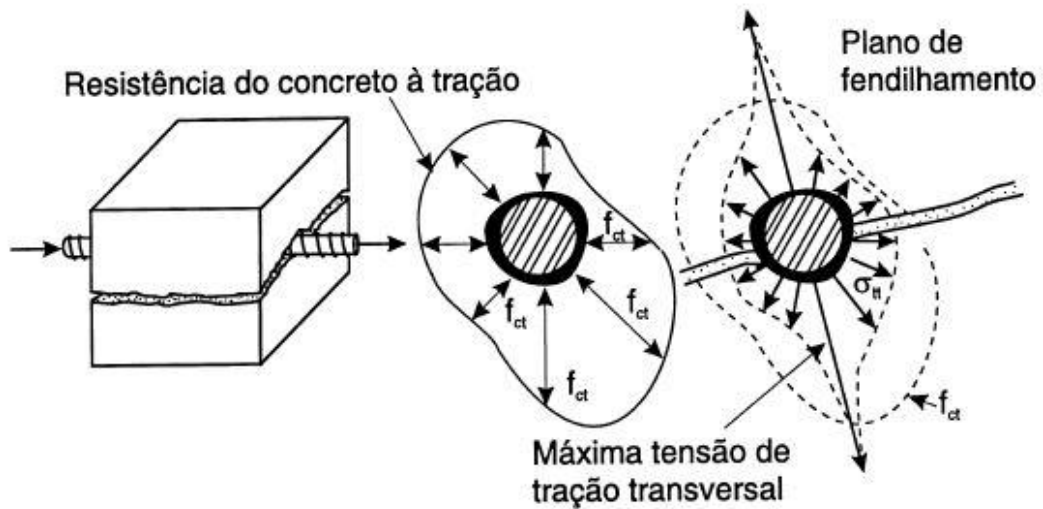
Figura 12 - Transferência de esforços por aderência



Fonte: Fusco (1995)

A ruptura por aderência não acontece apenas através de um deslizamento progressivo da barra de aço pelo concreto, pois são mobilizados esforços de tração transversais, que levam ao fendilhamento da peça de concreto em um eixo paralelo ao da barra, ilustrado na Figura 13 (FUSCO, 1995).

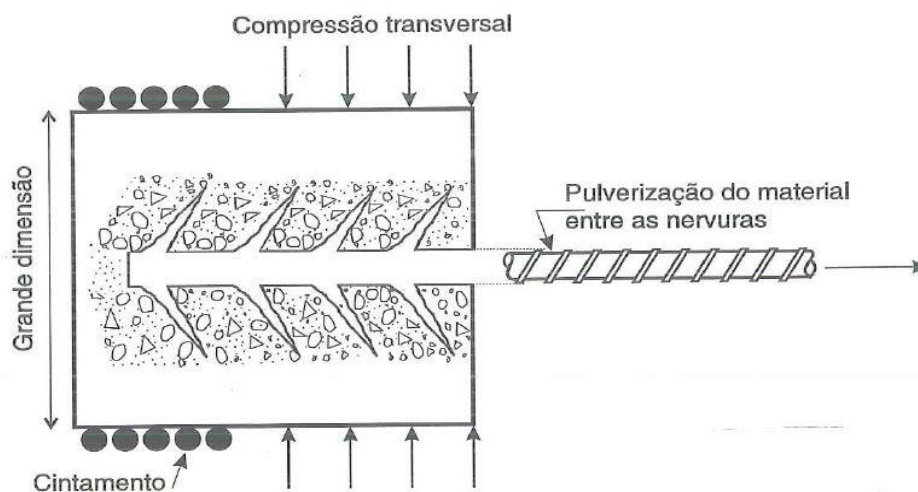
Figura 13 - Fendilhamento longitudinal do concreto



Fonte: Fusco (1995)

Para que possa ocorrer o arrancamento da barra de aço do interior do concreto apenas por deslizamento, é necessário que ocorra a pulverização de todo o material que ocupa o espaço entre as nervuras. Esse fenômeno ocorre mais facilmente nas barras lisas, pois as irregularidades superficiais do material são consideradas baixas. Nas barras nervuradas o deslizamento é bastante dificultado, a menos que se faça uso de armadura para reforço transversal, que absorvem os esforços de tração, impedindo o fendilhamento da peça, como ilustrado na Figura 14 (FUSCO, 1995).

Figura 14 - Condições para o deslizamento da barra de aço



Fonte: Fusco (1995)

2.3.5 Parâmetros que influenciam na aderência

Como relatado no ACI 408R-03 (ACI, 2003), durante muitos anos a tensão de aderência era traduzida como a tensão de cisalhamento existente na interface concreto-aço, sendo considerada uma propriedade intrínseca do material. Contudo, é de conhecimento atual que as tensões de aderência, ancoragem e das emendas são propriedades referentes à estrutura, estando vinculadas não só aos materiais como também às geometrias das barras de aço e da estrutura em si. Diversos são os fatores citados como influenciadores da aderência entre o concreto e as barras de aço, podendo estes ser divididos em três classes: características estruturais, propriedades das barras e propriedades do concreto.

2.3.5.1 Características estruturais

De acordo com o ACI 408R-03 (ACI, 2003), as características estruturais abordadas incluem o cobrimento de concreto, o espaçamento entre as barras, o comprimento de emenda, a posição da barra no ato da concretagem, o uso de armadura transversal, entre outros.

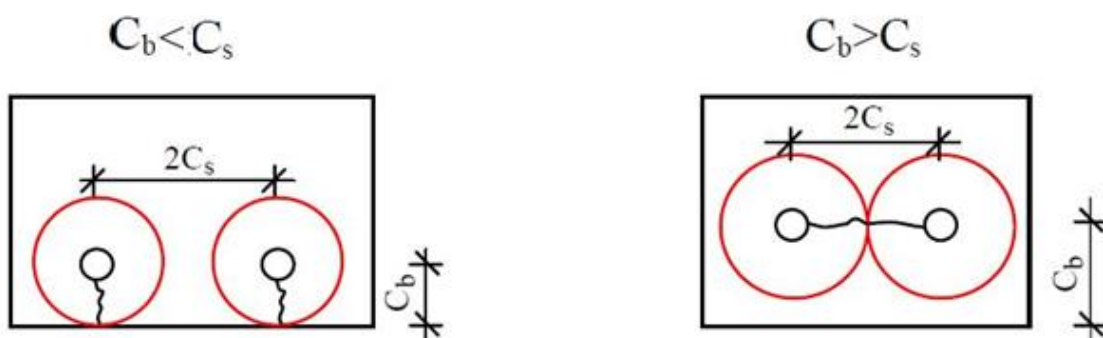
- ◆ Cobrimento de concreto e espaçamento entre as barras

O ACI 408R-03 (ACI, 2003) afirma que a curva tensão de aderência x deslizamento torna-se mais íngreme e que a tensão de aderência cresce à medida que a cobertura de concreto e o espaçamento entre as barras aumentam, devido ao aumento do confinamento.

O modo de ruptura também é influenciado pelo recobrimento e pelo espaçamento das barras: para ambos fatores, valores elevados resultam em ruptura por arrancamento da barra, ocasionada pelo corte e esmagamento do concreto que circunda o aço, enquanto valores mais baixos estão associados ao aparecimento de fissuras resultantes das tensões radiais de tração, resultando em falha por fendilhamento (ACI, 2003).

Grande contribuição ao estudo da relação entre cobrimento e fissuração foi dada pelo trabalho de Orangun et al (1977, *apud* CAETANO, 2008), no qual obteve-se a conclusão de que a região resistente do concreto corresponde a um círculo cujo raio é equivalente ao menor dos cobrimentos (lateral ou inferior) ou metade do espaçamento entre as barras. Portanto, no que diz respeito à ruptura, deve-se analisar o raio associado à menor área ao redor da barra. Se o valor do cobrimento do concreto for inferior à metade do espaço existente entre as barras, a falha acontecerá através do cobrimento até alcançar a superfície livre. Em contrapartida, se o cobrimento for superior à metade do espaçamento entre as barras, isso favorecerá o desenvolvimento de fissuras horizontais unindo as barras (Figura 15).

Figura 15 - Formas de ruptura por fendilhamento



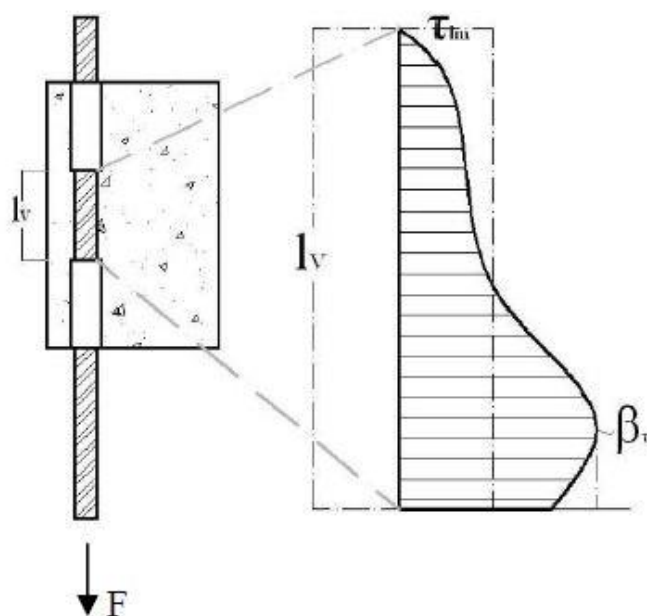
Fonte: Adaptado de Caetano (2008)

◆ Comprimento de aderência e de emenda

Quanto maiores os comprimentos de aderência e de emenda maior será a capacidade resistente na interface concreto-aço, embora este último acréscimo não seja diretamente proporcional ao primeiro. A não proporcionalidade está associada ao fato de as tensões de aderência não serem igualmente distribuídas ao longo da superfície da barra, Figura 16, e a ruptura da aderência acontecer por acréscimos. Isto é, apenas as nervuras mais próximas ao ponto de solicitação resistem, na fase inicial, ao carregamento em sua plenitude. Decorrida a ruptura do concreto em

contato com as nervuras atuantes, as nervuras mais distantes do ponto de aplicação da carga começam a trabalhar (ACI, 2003).

Figura 16 - Distribuição de tensões de aderência



Fonte: Caetano (2008)

◆ Armadura transversal

Caetano (2008) afirma que o modo de ruptura da aderência é bastante influenciado pelo confinamento gerado através do emprego de armaduras transversais ou estribos. Sua utilização transforma, por muitas vezes, a falha por fendilhamento em ruptura por deslizamento, elevando a capacidade de ancoragem. Ainda assim, a eficiência do confinamento vai se tornando progressivamente menor quando atingido determinado valor, até que novas adições de reforço transversal passam a não mais contribuir para o desempenho da aderência.

Ribeiro (1985) concluiu em seu trabalho que, inicialmente, as tensões de fendilhamento são resistidas inteiramente pelo concreto que envolve as barras, o que resulta em fissuras internas e externas. A partir desse ponto, boa parte da solicitação passa a ser resistida pelos estribos. Nos processos finais do carregamento, a fissuração ocupa significativa parcela do cobrimento, levando-se à

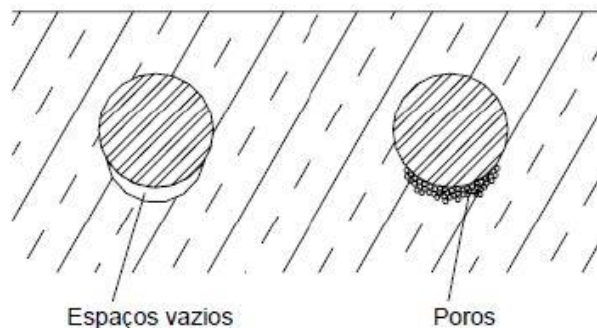
conclusão de que neste ponto os estribos são responsáveis por suportar a maior parte dos esforços de fendilhamento.

Outro aspecto confirmado por Ribeiro (1985) é a de que a presença dos estribos pode modificar a forma de ruptura. Em seu trabalho, para os corpos de prova sem reforço transversal, a ruptura acontecia no mesmo instante em que se iniciava o fendilhamento. Já nos cp's que contavam com estribos a ruptura se caracterizava como menos brusca e acontecia em um ou dois ciclos de carga após aquele que levava ao início do fendilhamento.

◆ Posição das barras durante a concretagem

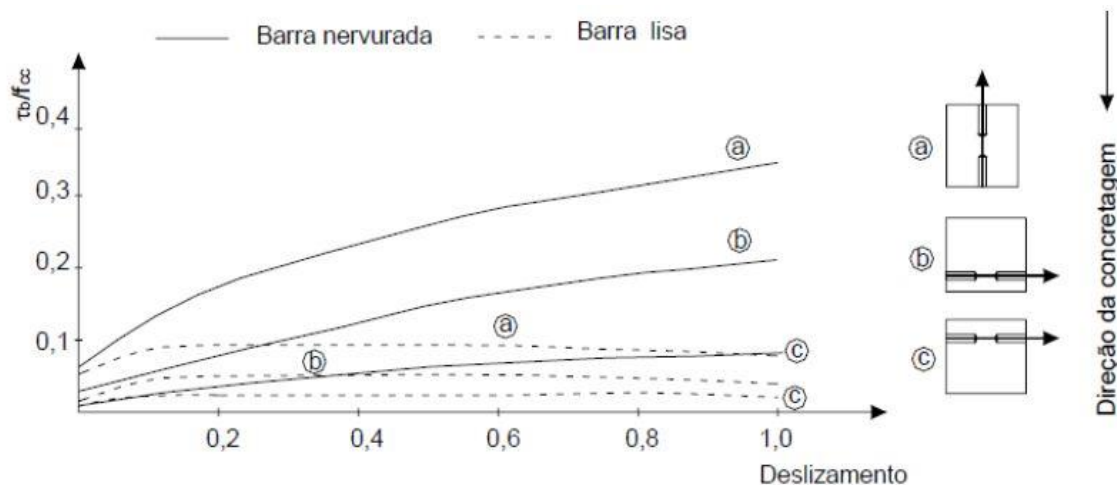
Para Leonhardt e Mönning (1977), o posicionamento da barra no sentido vertical ou horizontal no momento da concretagem influencia qualitativamente na aderência, bem como a altura da barra em relação ao fundo da forma. Em decorrência do fenômeno de segregação, que acontece nos concretos frescos, pode ocorrer uma concentração de água sob as barras, que acarretará na formação de vazios ou poros após ser absorvida pelo concreto (Figura 17). Esse fenômeno pode acarretar perda de 50% dos valores de aderência referentes às barras verticais e dependerá do fator água-cimento e da distância da barra ao fundo da fôrma ou à camada de concreto já endurecido (Figura 18).

Figura 17 - Formação de espaços vazios ou poros sob barras horizontais, devido à segregação e acumulação de água



Fonte: Leonhardt & Mönning (1977)

Figura 18 - Representação esquemática de ensaios de arrancamento de barras retas em diferentes posições por ocasião da concretagem



Fonte: Leonhardt & Mönning (1977)

O ACI 408R-03 (ACI, 2003) informa que, desde 1913, resultados apontam para o fato do posicionamento da barra dentro do elemento de concreto influenciar no fenômeno da aderência: barras localizadas em porção superior de uma viga apresentam desempenho menos eficiente quando comparadas àquelas colocadas em porção inferior. A ABNT NBR 6118 (2014) diferencia regiões de boa e má aderência, fazendo uso do coeficiente η_2 para cálculo do comprimento de ancoragem, similarmente considerando que barras localizadas no topo de elementos apresentam pior aderência.

◆ Idade de carregamento

Caetano (2008) explica que a idade do concreto influencia na aderência devido ao fato de estar associada aos fenômenos de hidratação do cimento e perda de água da matriz cimentícia.

Assim como as resistências à tração e à compressão aumentam com o tempo de cura do concreto, imagina-se que o mesmo aconteça com a tensão de aderência. Contudo, pesquisas de Fu e Chung (1998) resultaram em diminuição da tensão de aderência entre os 7 e 28 dias de cura, com ênfase na primeira metade desse intervalo. A explicação dada é que, com o desenvolver da cura, a retração do

concreto acontece, resultando em espaços vazios (poros), principalmente na interface aço-concreto, prejudiciais à aderência.

Existem ainda na literatura pesquisas com conclusões contrárias a apresentada anteriormente, como é o caso de Martin e Noakowski (1981, *apud* SANTANA, 2014), que demonstrou o aumento da resistência de aderência com a idade de carga, bem como as resistências à tração e compressão.

Analisando essa divergência entre diferentes pesquisas, Caetano (2008) concluiu que a idade de carregamento influencia sim na tensão de aderência, mas se faz necessário avaliar a interação entre o aumento da resistência do concreto à tração/compressão (que melhora o desempenho do mesmo frente aos esforços ocasionados pela tração na barra) e o aparecimento de poros na estrutura, especialmente na região que circunda a barra.

◆ Forças transversais

A resistência aderente é ainda influenciada pelas forças transversais de compressão, que desempenham basicamente dois papéis: aumentar o atrito entre a barra de aço e concreto e tardar ou mesmo impedir a ruptura por fendilhamento, levando à falha por arrancamento (CAETANO, 2008).

Xu et al. (2012) estudou o efeito da força transversal sobre o comportamento da aderência de barras lisas e nervuradas. Com base nos resultados experimentais, verificou-se que, para barras lisas, a tensão de aderência aumenta significativamente com o aumento da pressão lateral, enquanto que o deslizamento correspondente à tensão de aderência de pico é reduzido drasticamente. Através do uso das barras nervuradas, verificou-se que o comportamento da aderência está intimamente relacionado com a direção e a magnitude da força transversal. Quando a pressão lateral é aplicada paralelamente à nervura, a resistência de aderência aumenta com o aumento da pressão lateral. Quando a pressão lateral é perpendicular à nervura, a resistência de aderência permanece basicamente constante.

2.3.5.2 Propriedades das barras

Entre as características das barras que mais afetam a aderência entre o aço e o concreto, pode-se citar sua geometria, seu diâmetro, suas condições e conformações superficiais.

◆ Diâmetro da barra

De acordo como ACI 408R-03 (ACI, 2003), ao se estudar a capacidade de aderência como sendo a força capaz de arrancar uma barra envolta por concreto, para um mesmo comprimento de aderência, quando maior for o diâmetro da barra, maior deverá ser a força aplicada para levar à ruptura do elemento.

Entretanto, Ducatti e Agopyan (1993) chegaram à conclusão de que maiores diâmetros, acompanhados de maiores nervuras, retêm mais água de amassamento na região inferior à barra, o que propicia o surgimento de uma zona de transição mais espessa. Esse fato acaba por enfraquecer a ligação aço-concreto devido sua maior porosidade, facilitando a pulverização do concreto existente entre as nervuras.

Barbosa (2001), ao contrário da maior parte dos pesquisadores que estudaram os efeitos do diâmetro da barra sobre a aderência, concluiu que, ao se aumentar o diâmetro da barra, a tensão última de aderência também aumentava. A autora apontou como justificativa o fato do recobrimento e do comprimento de aderência estarem relacionados ao diâmetro da barra.

◆ Condição superficial da barra

O estado superficial da barra de aço desenvolve função importante da capacidade de aderência devido sua consequência sobre o atrito existente entre a barra e o concreto, como também sobre a capacidade de transferência de tensões entre ambos os materiais. Entretanto, esse efeito é mais significativo para o caso de barras lisas, visto que a aderência nesses casos está relacionada, essencialmente, às parcelas de adesão e de atrito, que são afetadas pela presença de substâncias como graxas, oxidação e poeiras (SANTANA, 2014).

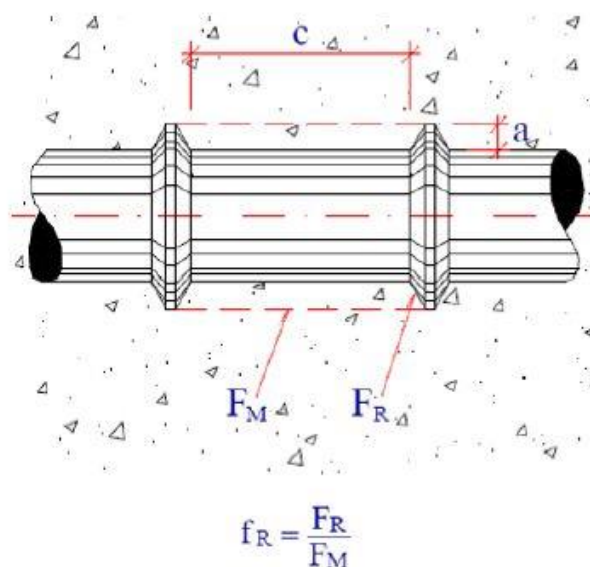
Dumêt (2003) cita que, para o caso de barras lisas, fios e cordoalhas que têm giro livre, uma maior rugosidade da superfície, muitas vezes resultante da oxidação da barra, pode acarretar melhorias na parcela mecânica da aderência. Porém, cautela se faz necessária, pois uma maior oxidação pode resultar em diminuição excessiva do diâmetro da barra, causando perda na capacidade resistente.

◆ Conformação superficial das barras

Segundo Leonhardt e Mönning (1977), em barras nervuradas, a aderência mecânica acontece por meio de engrenamento mecânico, tipo encaixe, que acontece entre a superfície da barra de aço e o concreto, formando assim os “consolos de concreto”. Esses consolos sofrem solicitação ao corte antes de acontecer o deslizamento da barra no concreto.

O valor da parcela mecânica da aderência depende da forma, inclinação e altura (a) das nervuras, como também da distância (c) livre entre elas (Figura 19). Leonhardt e Mönning (1977) citam ainda um parâmetro denominado superfície nervurada relativa, que é a relação entre a superfície F_R das nervuras (igual à área de contato entre os consolos e as nervuras) e a superfície lateral F_M de concreto sujeito ao corte, ambos representados ainda na Figura 19. Esse parâmetro pode ser utilizado para comparação de barras com diferentes perfis.

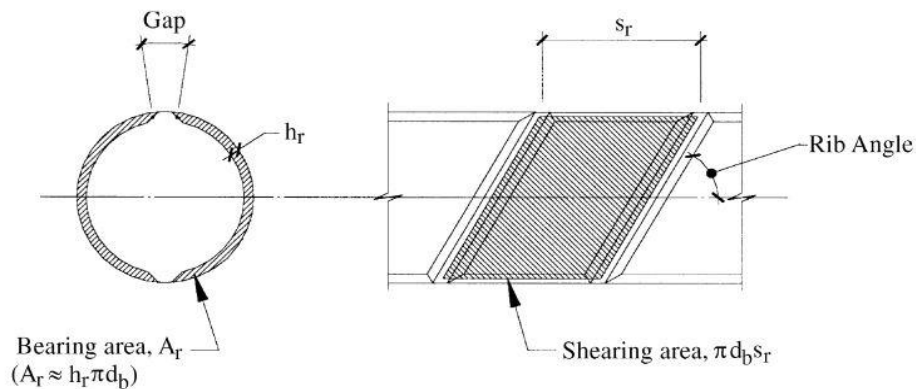
Figura 19 - Superfície relativa da nervura



Fonte: Leonhardt & Mönning (1977)

Outra forma de calcular a área relativa da nervura é proposta pelo ACI 408R-03 (ACI, 2003), onde são consideradas as *Shearing area* e *Bearing area*, mostradas na Figura 20.

Figura 20 - Desenho esquemático com os termos da expressão da área relativa das nervuras



Fonte: ACI (2003)

Assim, utilizando-se a expressão (2), define-se a área relativa da nervura f_r como sendo:

$$f_r = \frac{\text{Bearing area}}{\text{Shearing area}} \approx \frac{h_r}{s_r} \quad (2)$$

O próprio ACI (2003) faz ainda uma correção para esses valores, por meio do uso de uma constante que varia entre 0,8 e 0,9, mostrada na expressão (3):

$$f_r = \frac{\text{Bearing area}}{\text{Shearing area}} = (0,8 \text{ a } 0,9) \times \frac{h_r}{s_r} \quad (3)$$

Lorentz e Holzenbein (1979, *apud* CAETANO, 2008), visando estudar a influência do fator f_r na capacidade de aderência, usaram três configurações distintas de barras, mantendo constante a área relativa de nervura. Os resultados mostraram que a tensão de aderência se manteve constante para deslizamentos superiores a 1 mm, provando que a área da nervura é crucial no comportamento da aderência. Entretanto, verificou-se que 100% dos corpos-de-prova que apresentavam nervuras com maior altura romperam por fendilhamento, enquanto

que 80% daqueles com nervuras de menor altura e espaçamento falharam por deslizamento.

2.3.5.3 Propriedades do concreto

Dentre as propriedades do concreto que influenciam diretamente na tensão de aderência, serão abordadas as seguintes: resistência à compressão, o tipo e a quantidade de agregados, a utilização de adições minerais, o adensamento e a utilização de fibras.

◆ Resistência à compressão

Conforme relatado por Ribeiro (1985), a resistência à compressão do concreto é mais significativamente influente no comportamento da aderência nos casos em que a ruptura acontece por arrancamento da barra, típico de concretos com menor resistência, visto que nessas situações acontece o corte do concreto que envolve a barra e o esmagamento da região situada à frente da nervura. Por outro lado, a característica do concreto que governa a falha por fendilhamento é a resistência à tração, que, quando superada pelas tensões radiais internas, permite o surgimento de fissuras longitudinais.

De acordo com Eligehausen (1983), a tensão última de aderência é aproximadamente igual ao aumento da resistência à tração do concreto, que é proporcional à raiz quadrada de sua resistência à compressão. Entretanto, o ACI 408R-03 (ACI, 2003) alerta que essa relação se mostra adequada apenas para concretos com resistência inferior a 55 MPa, pois o aumento da resistência à compressão resulta em aumento da fragilidade do concreto.

Caetano (2008) conclui que o aumento na resistência à compressão do concreto beneficia a aderência, contanto que reforços de confinamento sejam utilizados para controlar a predisposição apresentada por concretos de alta resistência para ruptura frágil, podendo resultar em falhas precipitadas por fendilhamento.

◆ Adições

A maior parte dos estudos sobre o efeito das adições minerais na resistência aderente tem sido limitada aos efeitos da sílica, principal mistura mineral utilizada para obtenção de concretos com alta resistência. Devido ao aumento significativo da resistência à compressão para muitos dos concretos contendo sílica, as comparações geralmente foram baseadas no valor da tensão última de aderência como sendo a raiz quadrada da resistência à compressão. Como este valor superestima o efeito da resistência à compressão, muitas vezes foi feita a conclusão de que o uso da sílica tem um efeito negativo sobre a capacidade de aderência, facilitando a ruptura por fendilhamento devido ao comportamento frágil desse tipo de concreto (ACI, 2003).

Vieira (1994) estudou a influência da utilização de 10% de sílica ativa sobre o peso do cimento em concretos de alta resistência. Como resultado obteve uma melhoria de 20% na tensão de aderência para barras nervuradas. Resultados de mesmo caráter foram obtidos por Mehta e Monteiro (2008) ao utilizarem teores de sílica ativa de 0%, 8% e 16% da massa de cimento.

Por outro lado, Hamad e Machaka (1999), ao estudarem concretos com altos teores de sílica, registraram uma diminuição na tensão de aderência em elementos sem reforço transversal. O uso de reforço transversal aumentou a tensão de aderência e a ductilidade do modo.

Mesmo em meio à contradição de resultados, é de consenso entre os pesquisadores a ruptura frágil e repentina apresentada por concretos com adição de sílica ativa, em especial aqueles com ausência de armadura transversal.

◆ Presença de fibras

A utilização de fibras no concreto provoca efeito semelhante ao do uso de armadura transversal, provocando o confinamento da estrutura. Seu objetivo principal é aumentar a ductilidade do compósito, contribuindo para o processamento de rupturas mais dúcteis. No que diz respeito à aderência, o aumento da ductilidade dificulta o surgimento de fissuras e, por consequência, desfavorece o fendilhamento, levando à falha por arrancamento da barra (SANTANA, 2014).

Simplício (2008) estudou o fenômeno da aderência em corpos de prova confeccionados com concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço. Através de seus resultados, concluiu que a presença de fibras aumenta de forma significativa a tensão máxima de aderência, quando comparado ao concreto sem fibras. Entretanto, a variabilidade de teores empregada (0,5%, 0,75% e 1%) não resultou em considerável variação da tensão máxima de aderência.

Estudando concretos auto-adensáveis, Tojal (2011) verificou que a presença de fibras retardou o surgimento de fissuras, bem como sua propagação no elemento de concreto. Além disso, as fissuras que se desenvolveram apresentaram abertura bastante inferior às aberturas desenvolvidas no concreto auto-adensável sem fibras. Ao se adicionar as fibras, maior deformabilidade é alcançada e acontece a formação de muitas microfissuras, em substituição de uma única de abertura maior.

◆ Adensamento

Através do adensamento são eliminados os vazios gerados durante a fabricação, o manuseio e a aplicação do concreto, sendo fator importantíssimo para garantia da qualidade do material. No que tange à aderência, um adensamento apropriado, geralmente resultado de vibração, diminui a segregação e a exsudação, causadoras do acúmulo de água e de concreto fraco com baixa densidade na região abaixo das nervuras da barra, mais susceptível à ruptura durante solicitações (SANTANA, 2014).

Chan et al. (2003) estudaram o efeito do adensamento sobre a aderência aço-concreto, utilizando como principais variáveis o grau de adensamento e a trabalhabilidade do concreto. Os resultados experimentais indicaram que a vibração é absolutamente importante para o desenvolvimento da tensão de aderência de barras em concreto normal. A capacidade de aderência do concreto normal é significativamente reduzida quando nenhuma vibração é aplicada. A aplicação de vibração em concreto de alto desempenho é tão crucial que a revibração ou a vibração inadequada resultariam em uma redução substancial na tensão última de aderência. Sem qualquer vibração, o concreto auto-adensável é capaz de desenvolver uma aderência notavelmente maior do que o concreto convencional

submetido ao adensamento. Além disso, a aplicação de vibração nesse último tipo pode afetar negativamente a aderência e deve ser prevenida.

2.3.6 Ensaios de Aderência

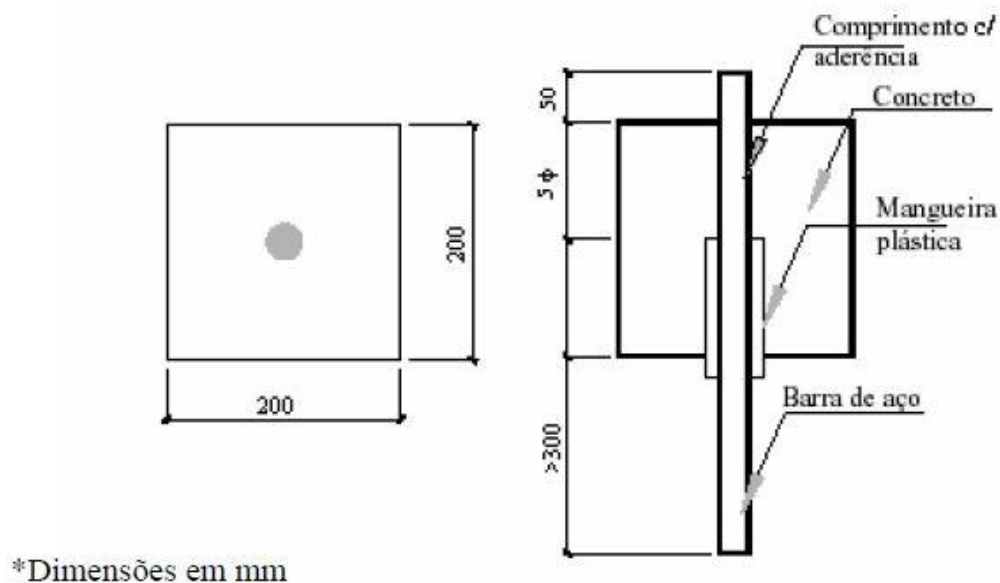
Existem diversos ensaios que visam estudar o comportamento da aderência, além de avaliar os diversos fatores que o influenciam, tais como: resistência à compressão do concreto, diâmetro da barra de aço, sentido do carregamento, entre outros. A seguir, são descritos alguns desses procedimentos.

2.3.6.1 Ensaios de Arrancamento Simples (Pull-Out Test)

O ensaio de arrancamento simples (pull-out test) consiste na extração de uma barra de aço posicionada na região central de um corpo-de-prova de concreto, com comprimento de aderência igual a 5ϕ , apoiado sobre placas em uma máquina de ensaio. Na extremidade livre da barra se faz a medida de seu deslocamento em relação ao bloco de concreto, enquanto é aplicada uma força de tração na outra extremidade.

A literatura cita que o ensaio de arrancamento simples sofreu modificações no decorrer dos anos. Inicialmente, todo o comprimento da barra que atravessava o bloco de concreto ficava em contato direto com a matriz cimentícia e não se realizava a medida do deslocamento relativo da barra. Mais tarde, as leituras de deslocamentos começaram a ser realizadas e inseriu-se um tubo plástico na extremidade próxima ao carregamento, limitando o comprimento de aderência e evitando que a barra fosse afetada por tensões de compressão geradas pela placa utilizada no ensaio. Em 1982, a RILEM publicou um trabalho que estabelecia as dimensões padrões para os corpos-de-prova, que são ainda utilizadas atualmente (Figura 21).

Figura 21 - Dimensões do corpo-de-prova do ensaio de (RILEM RC5, 1982)

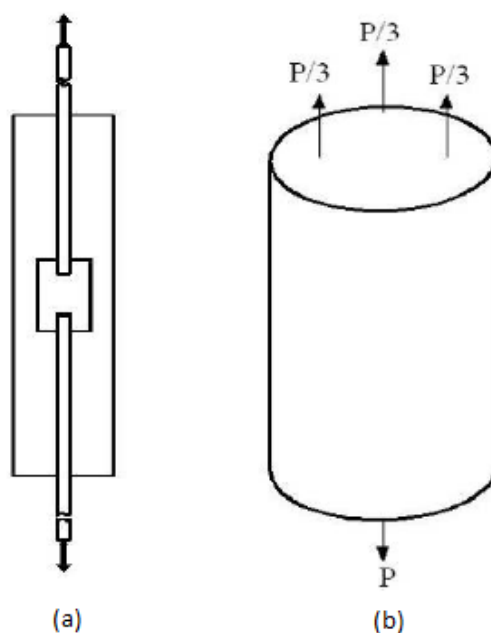


Fonte: RILEM RC5 (1982)

Este é um dos ensaios mais utilizados por sua facilidade de execução, utilizando corpos-de-prova com dimensões reduzidas. Entretanto, por sua simplicidade, não é capaz de simular o complexo estado de tensões que realmente acontece no interior de estruturas de concreto armado reais.

Outras variações desse ensaio são encontradas na literatura. Caetano (2008) cita o ensaio de duplo arrancamento e o de quatro barras (Figura 22). O ensaio de duplo arrancamento consiste na inserção de dois segmentos de barras, em extremidades opostas do corpo-de-prova, com aplicação de carga em ambas as extremidades. Já no ensaio de quatro barras, uma barra localizada na extremidade do carregamento, e as outras três no lado oposto. Esse arranjo tem a finalidade de imobilizar o corpo-de-prova, utilizando uma força de reação nas três barras, que estão ligadas por meio de um disco metálico.

Figura 22 - Representação esquemática dos corpos-de-prova para ensaio de duplo arrancamento (a) e quatro barras (b)



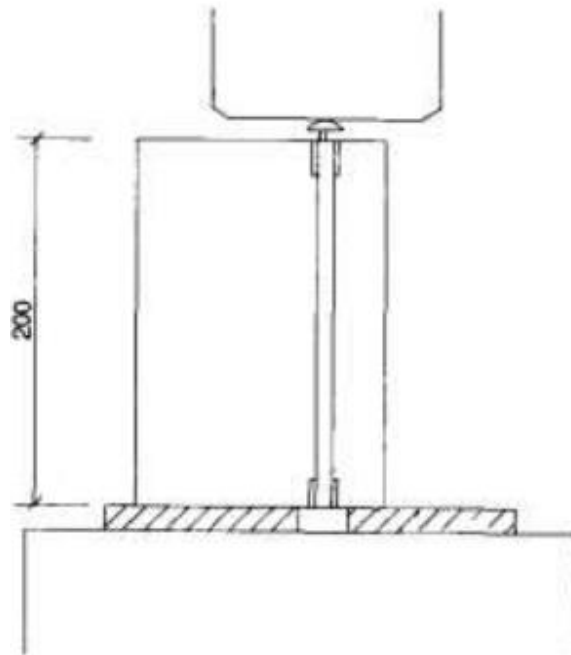
Fonte: Caetano (2008)

Devido à complexidade da confecção dos corpos-de-prova de quatro barras, este ensaio não é muito utilizado na literatura por pesquisadores. O mesmo não acontece com o ensaio de duplo arrancamento.

2.3.6.2 *Push-out test*

A publicação AAC 8.2 (1992) – *Push-out test for reinforcement* do RILEM traz as configurações do ensaio de *push-out*, com a finalidade de determinar a capacidade de aderência entre barras de aço e concreto celular autoclavado (AAC). Apesar da carência no detalhamento do ensaio, a publicação indica que a amostra a ser ensaiada deve ser um prisma cortado de uma laje reforçada de modo que apresente seção transversal correspondente à seção da laje. Uma barra de aço é, então, incorporada ao corpo-de-prova prismático ao longo de um determinado comprimento, e submetida à tensão de compressão gerada por uma força aplicada em uma de suas extremidades (Figura 23).

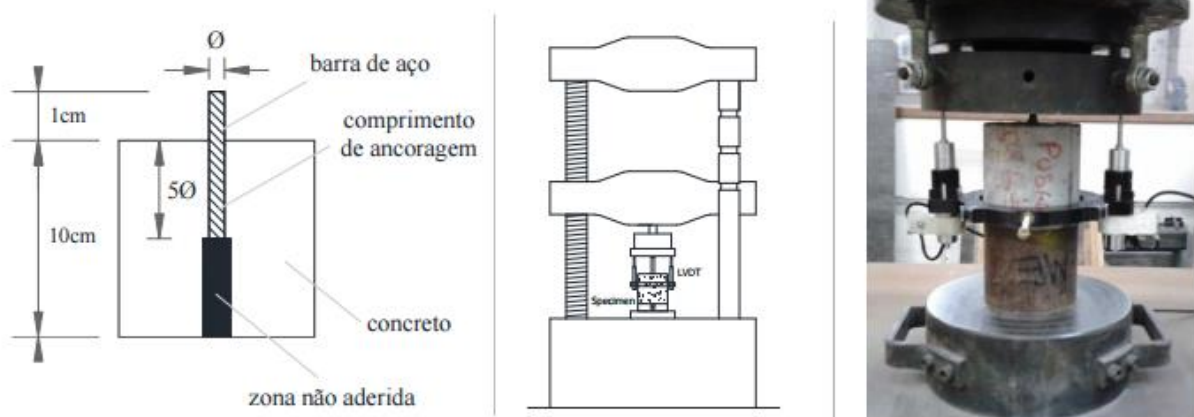
Figura 23 - Posição da amostra para o ensaio push-out em AAC



Fonte: RILEM AAC 8.2 (1992)

Bosco et al. (2012), intencionando comparar os resultados obtidos em ensaios tipo *pull-out* com aqueles alcançados por derivações do ensaio tipo *push-out*, desenvolveram uma metodologia baseada no conceito de *push-out* apresentado pelo RILEM. Essa metodologia é apresentada na Figura 24 a seguir.

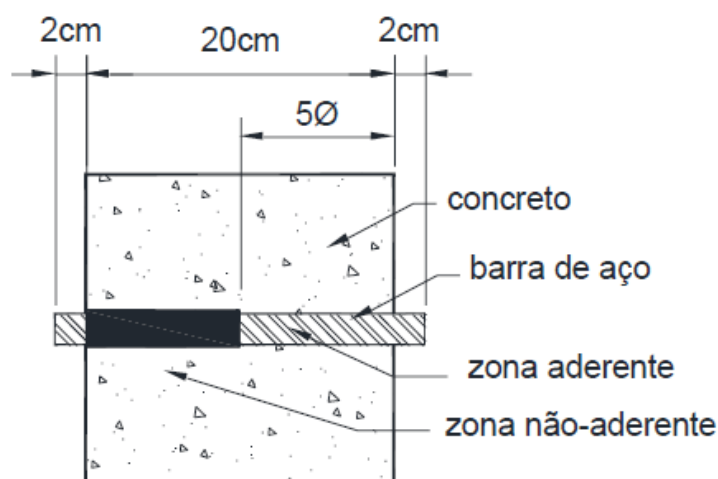
Figura 24 - Esquema e foto do corpo-de-prova e do método de ensaio push-out



Fonte: Bosco et al. (2012)

Melo (2016) realizou ensaio de *push-out* com corpos-de-prova prismáticos de dimensões 20 cm x 20 cm x 20 cm e comprimento de ancoragem igual a cinco vezes o diâmetro da barra (Figura 25).

Figura 25 – Esquema dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out test (cm)



Fonte: Melo (2016)

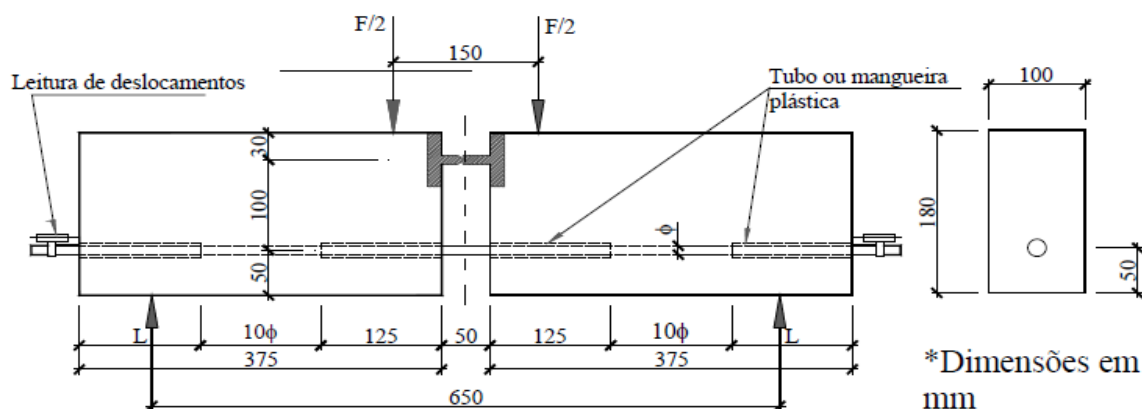
2.3.6.3 Ensaio de Viga (Beam Test)

Como exposto anteriormente, apesar de apresentar facilidade na execução, os ensaios de arrancamento simples não simulam de forma fiel o campo de tensões gerado em situações reais. Sendo assim, o ensaio de viga é apontado como um melhor procedimento para avaliação da capacidade de ancoragem de barras em elementos estruturais. Apesar de execução mais complexa, devido à dificuldade de montagem e o peso dos corpos-de-prova, esse ensaio pode avaliar variáveis como o comprimento de ancoragem, o diâmetro da barra, o tipo de carregamento, presença ou não de reforço transversal, resistência à compressão do concreto e a presença de fibras.

No ensaio de viga, o corpo-de-prova é constituído por dois blocos de concreto armado, conectados inferiormente pela barra onde se interessa estudar a aderência, e superiormente por uma rótula metálica. No tipo A (Figura 26) são utilizadas barras

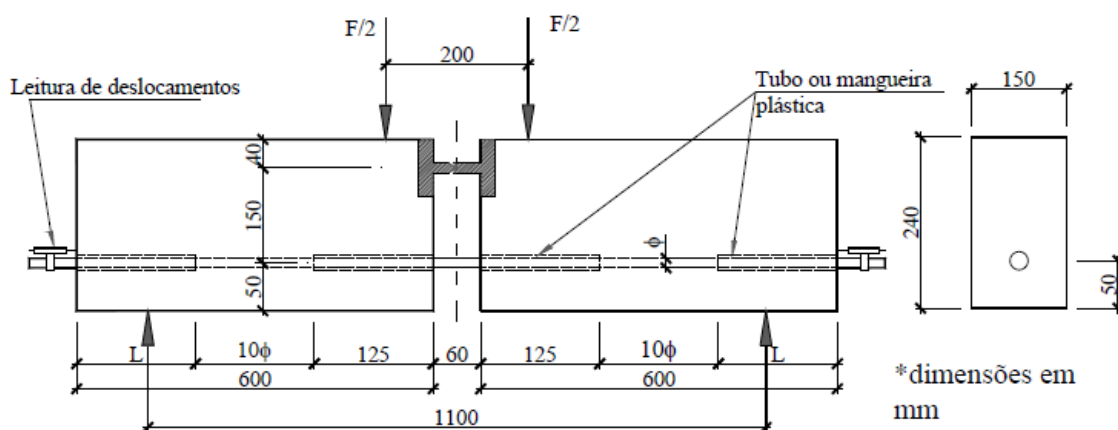
com diâmetro variando de 10 mm a 16 mm, já no tipo B diâmetros entre 16 mm e 32 mm (Figura 27).

Figura 26 - Ensaio de viga tipo A



Fonte: RILEM RC 5 (1982)

Figura 27 - Ensaio de viga tipo B



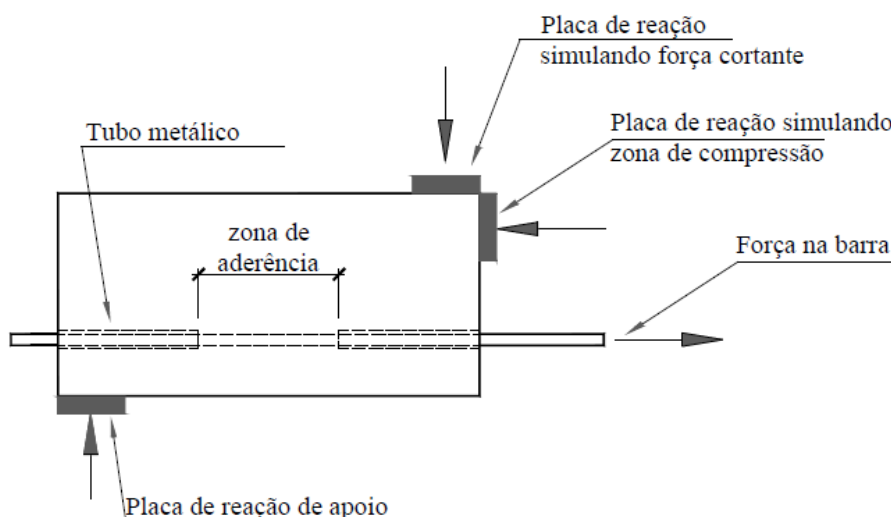
Fonte: RILEM RC 5 (1982)

Durante a realização do ensaio, duas cargas de mesma magnitude e situadas simetricamente em relação à metade do vão são aplicadas, submetendo a viga à flexão simples. Desse modo, é permitido que ocorra a flexão do modelo sem causar uma curvatura excessiva na região aderente, como também se torna possível se determinar a carga que está sendo aplicada na barra, por meio da teoria de forças binárias (CAETANO, 2008).

2.3.6.4 Ensaio de extremo de viga (*Beam End Test*)

Surgindo como uma adaptação do ensaio de viga, o ensaio de extremo de viga apresenta a vantagem de utilizar corpos-de-prova com dimensões reduzidas. Consiste em uma barra submetida à tração, localizada na porção inferior da viga, e uma placa de reação utilizada para simular a zona de compressão na parte superior do corpo-de-prova. O momento gerado a partir desse esquema de forças é combatido por um binário atuando perpendicularmente à barra, e reproduzem a reação de apoio e a força cortante atuantes em uma estrutura real (Figura 28).

Figura 28 - Ensaio de extremidade de viga



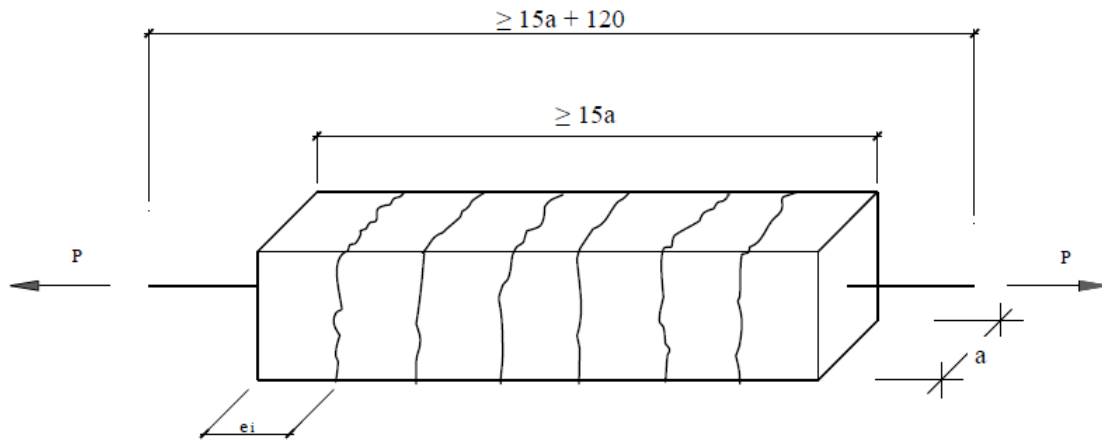
Fonte: Simplicio (2008)

2.3.6.5 Ensaio de tração direta

De acordo com Barbosa (2001), este ensaio consiste na aplicação de uma força de tração nos extremos de uma barra de um tirante de concreto armado, cilíndrico ou prismático, para avaliação da aderência aço-concreto (Figura 29). A força máxima aplicada corresponde a 80% da tensão de escoamento do aço, e é dividida em 5 intervalos. De modo geral, o ensaio visa estudar a fissuração,

reproduzir a zona de transição entre duas fissuras, e identificar a tensão de aderência e o coeficiente de conformação superficial das barras.

Figura 29 - Ensaio de tirante (dimensões em mm)



Fonte: Barbosa (2001)

A NBR 7477 (1982) fornece a expressão para o cálculo do coeficiente de conformação superficial da barra, utilizando o afastamento (e_i) e a quantidade de fissuras (n):

$$\eta = \frac{2,25 \times a}{X_m} \quad (4)$$

Onde,

η - coeficiente superficial

a – lado da seção do tirante

X_m - espaçamento médio entre fissuras

$$X_m = \left(\frac{1}{n}\right) \times \sum e_i \quad (5)$$

O espaçamento médio entre fissuras também é utilizado para se determinar a tensão média de aderência de barras de aço em concretos com diferentes resistências, através da seguinte expressão:

$$\tau_{bm} = 0,375 \times \frac{f_{ct}}{X_m} \times \frac{\phi}{\rho} \quad (6)$$

Sendo,

τ_{bm} – tensão média de aderência

f_{ct} – resistência à tração simples do concreto

ϕ - diâmetro da barra

ρ - taxa de armadura $\left(\frac{A_s}{A_c}\right)$

2.3.7 Resistência de aderência segundo a NBR 6118

A ABNT NBR 6118:2014, em seu item 9.3.2, apresenta a expressão para obtenção da resistência de aderência de cálculo entre a armadura e o concreto na ancoragem de armaduras passivas, mostrada a seguir:

$$f_{bd} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \times f_{ctd} \quad (7)$$

Onde,

- f_{bd} = resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;
- η_1, η_2, η_3 = coeficientes para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva;
 - $\eta_1 = 1,0$ para barras lisas; $\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas; $\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas;
 - $\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência; $\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência;
 - $\eta_3 = 1,0$ para ϕ (diâmetro da barra) < 32 mm; $\eta_3 = (132 - \phi)/100$, para $\phi \geq 32$ mm;

- $f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (8)$

- $f_{ctk,inf} = 0,7 \times f_{ctm} \quad (9)$

- Para concretos de classes até C50:

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3} \quad (10)$$

- Para concretos de classes C55 até C90:

$$f_{ct,m} = 2,12 \ln(1 + 0,11 f_c) \quad (11)$$

Para $f_{ckj} \geq 7$ MPa, estas expressões podem também ser usadas para idades diferentes de 28 dias.

São considerados, quanto à aderência, em boa situação, os trechos das barras que estejam em uma das posições seguintes:

a) com inclinação superior a 45° sobre a horizontal

b) horizontais ou com inclinação inferior a 45° sobre a horizontal, desde que:

- para elementos estruturais com $h < 60$ cm, situados 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, situados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

Em outras posições e quando do uso de formas deslizantes, os trechos das barras devem ser considerados em má situação quanto à aderência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O principal objetivo do programa experimental desenvolvido foi avaliar a tensão de aderência concreto-aço, utilizando as seguintes variáveis para análise: o diâmetro da armadura (10,0, 12,5 e 16,0 mm) e a incorporação ou não de fibras de aço ao concreto.

O traço de dosagem de concreto foi especificado para uma resistência à compressão de 60 MPa aos 28 dias e adaptado de Simplício (2008) para os agregados da região e os demais materiais utilizados.

Todos os procedimentos e ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais de Construção (LEMC), Bloco BK, da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Sede.

Foram realizadas as seguintes atividades:

- Ensaios para caracterização dos materiais;
- Adequação experimental do traço;
- Processamento da mistura;
- Moldagem dos corpos-de-prova;
- Cura imersa dos corpos-de-prova;
- Ensaios de resistência à compressão;
- Ensaios de *push-out*.

O traço piloto adotado foi de 1 : 0,08 : 1,23 : 1,59 : 0,27 (cimento : sílica : areia : brita ; a/c). Foram moldados 4 corpos-de-provas, a partir dos quais foram determinadas as resistências à compressão aos 3 dias e aos 21 dias, obtendo-se os valores, respectivamente, de 35 MPa e 52 MPa.

Fixado o traço, foram moldados 26 corpos-de-prova, que passaram por cura úmida, dentre eles 8 para ensaios de resistência à compressão e 18 para ensaios de *push-out* (Tabela 2).

Tabela 2 - Quantidades de corpos de prova por tipo de concreto e ensaio

Concretos	ϕ (mm)	Quantidade de corpos-de-prova	
		Resistência à compressão	<i>Push-out</i>
Sem fibra	10.0		3
	12.5	4	3
	16.0		3
Com fibra	10.0		3
	12.5	4	3
	16.0		3

Fonte: Próprio autor

3.1 Materiais

3.1.1 Concreto

Foi utilizado o mesmo traço e os mesmos materiais para a confecção de ambos os concretos, com e sem adição de fibras de aço. A Tabela 3 apresenta a quantidade, em kg, de cada um dos materiais, para a obtenção de um metro cúbico de concreto.

Tabela 3 - Composição do concreto utilizado

Componentes	Quantidade (kg/m ³)
Cimento (kg)	666,25
Sílica ativa (kg)	52,80
Areia (kg)	819,50
Brita 19 mm (kg)	1058,50
Superplastificante (kg)	13,38
Água (kg)	194,25
a/(c + s.a) *	0,27

Fonte: Próprio autor

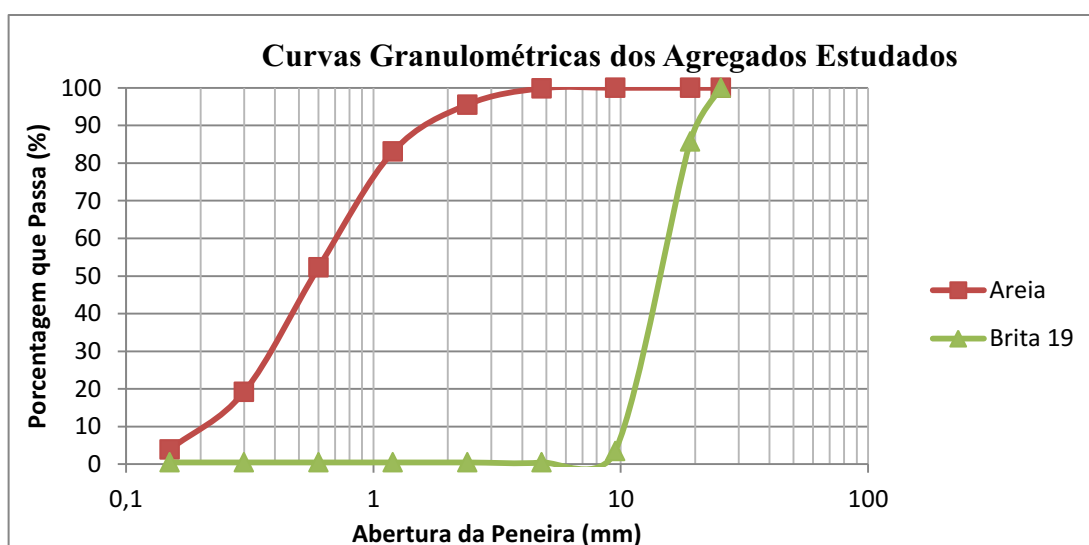
O cimento utilizado foi o CP II Z-32 (Cimento Portland Composto com Pozolana), do fabricante Elizabeth, de um mesmo lote de fabricação. A escolha desse tipo de cimento é justificada pela grande utilização do mesmo em obras convencionais.

Para que se fosse possível atingir uma resistência à compressão de 60 MPa aos 21 dias, foi utilizada sílica ativa, do fabricante Ferbasa. Sua dosagem recomendada é de 3 a 10% em relação ao peso do cimento. A presença dessas partículas muito pequenas no concreto ocupa os espaços vazios, resultando em um concreto mais denso e resistente. O uso de sílica ativa e em conjunto com um aditivo superplastificante resulta em um concreto de alta resistência.

Para sanar a perda de trabalhabilidade oriunda do baixo fator água/cimento e da utilização de fibras de aço na mistura, utilizou-se o aditivo superplastificante de alto desempenho MC–Powerflow 3100, do fabricante MC-Bauchemie Brasil. Sua dosagem recomendada é de 0,2 a 5,0% sobre o peso do cimento. Foi utilizada nessa pesquisa a dosagem de 2,0%.

Os agregados utilizados, brita e areia, foram caracterizados através dos ensaios de granulometria e massa específica. Os resultados são apresentados na Figura 30 e na Tabela 4.

Figura 30 - Granulometria da areia e brita utilizadas



Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Caracterização dos agregados

Características	Areia	Brita 19
Diâmetro máximo (mm)	4,8	19
Modulo de finura	2,46	7,08
Massa específica (g/cm ³)	2,59	2,61

Fonte: Próprio autor

3.1.2 Fibras de aço

Foram utilizadas as fibras de aço Dramix RC 65/60 – BN, que são produzidas a partir de fios de aço trefilados e são coladas em pente através de substância solúvel em água, permitindo rapidez na mistura e uma distribuição perfeitamente homogênea (Figura 31).

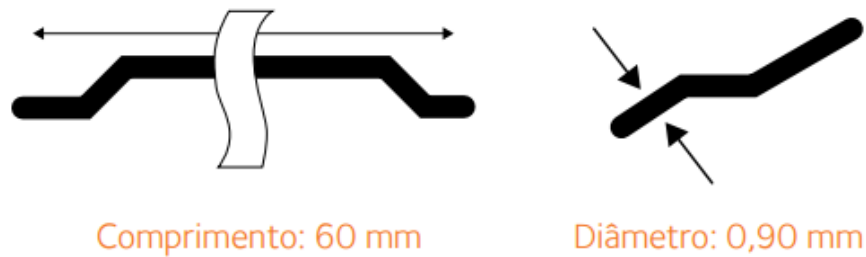
Figura 31 - Fibra Dramix RC 65/60 - BN



Fonte: Catálogo Dramix

As características geométricas das fibras são apresentadas na Figura 32 a seguir. Seu fator de forma (comprimento/diâmetro) é igual a 67, a dosagem mínima indicada pelo fabricante é de 15 kg/m³ e o arame apresenta resistência à tração mínima de 1000 N/mm². A porcentagem de fibra sobre o volume total da mistura adotada nesse estudo foi de 0,75%.

Figura 32 - Geometria das fibras



Fonte: Catálogo Dramix

3.1.3 Barras de aço

O aço utilizado para confecção dos corpos de prova dos ensaios de *push-out* foi o CA 50 (aço para concreto armado) com superfície nervurada, com diâmetros nominais de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm. A Tabela 5 apresenta as características geométricas das barras utilizadas nos ensaios. A altura e distância entre nervuras foram medidas diretamente nas barras.

Tabela 5 - Características geométricas das barras

Diâmetro (mm)	Altura da nervura (mm)	Distância entre nervuras (mm)
10.0	0,8	6,1
12.5	1,05	8,1
16	1,50	9,8

Fonte: Próprio autor

3.2 Métodos

3.2.1 Confecção dos corpos-de-prova

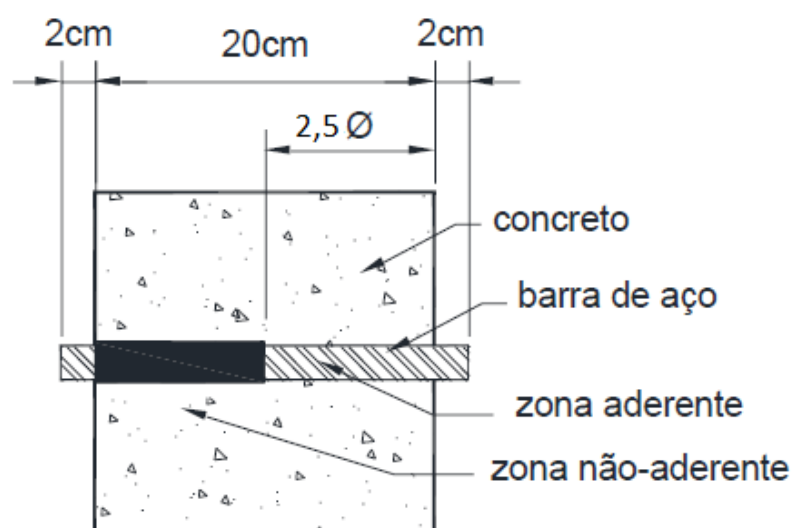
Para cada um dos dois tipos de concreto, com e sem incorporação da fibra de aço, foram moldadas 13 amostras, finalizando com um total de 26 corpos-de-prova. Das 13 amostras, 4 corpos-de-prova eram destinados ao ensaio de resistência à compressão, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, como manda a ABNT NBR

5739:2007, e 9 corpos-de-prova prismáticos para o ensaio de *push-out*, sendo três para cada diâmetro de barra (10, 12,5 e 16 mm), com dimensões 20 cm x 20 cm x 20 cm, seguindo as recomendações do RILEM RC6 (1983).

O comprimento de aderência indicado pelo RILEM RC6 (1983) é de cinco vezes o diâmetro. Simplício (2008), ao estudar a aderência de barras de aço em concretos de alto desempenho, verificou que, para esse comprimento de aderência, no decorrer do ensaio, em vários modelos, acontecia o escoamento e ruptura da barra, antes mesmo da ruptura do concreto ou do arrancamento da barra. Após essa constatação, o autor optou por utilizar comprimento de aderência igual a 3ϕ .

Analisando-se o fato explicitado acima, decidiu-se utilizar nessa pesquisa corpos-de-prova com comprimento de trecho aderido igual a $2,5\phi$. Assim, seria possível analisar os efeitos da redução do comprimento de aderência através da comparação com os resultados encontrados por Simplício (2008). As dimensões dos modelos estão apresentadas na Figura 33.

Figura 33 - Dimensão dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out test (cm)



Fonte: Adaptado de Melo (2016)

A forma utilizada para a fabricação dos modelos foi confeccionada a partir de madeira plastificada de 10 mm de espessura. Em cada moldagem, existia o cuidado em observar sua estanqueidade e suas dimensões. Para que se garantisse o

comprimento de aderência desejado, foi utilizada uma mangueira plástica envolvendo as barras nos trechos não aderentes, e foi feita a vedação através de fita isolante, a fim de impedir que o concreto fresco adentrasse na mangueira.

Durante a concretagem, as barras eram posicionadas na região central do corpo-de-prova, com o cuidado de impedir o aparecimento de qualquer excentricidade (Figura 34). Após a fixação da barra, foi feita a vedação da forma com fita isolante e foi aplicado desmoldante para facilitar a desforma dos modelos.

Figura 34 - Barra de aço posicionada no interior da forma



Fonte: Próprio autor

Para mistura dos constituintes do concreto, foi utilizada betoneira de eixo inclinado. Inicialmente, foi feita a mistura dos materiais secos, para posterior acréscimo de água e superplastificante. As fibras foram adicionadas à mistura fresca de forma fracionada, para que sua dispersão na mistura fresca fosse facilitada.

Tentou-se fazer a caracterização dos concretos através da medida de seu abatimento, seguindo a NBR NM 67 (ABNT, 1998), porém a consistência dos concretos não permitiu a coleta desses dados (Figura 35).

Figura 35 - Ensaio do abatimento do tronco de cone



Fonte: Próprio autor

O preenchimento das formas foi realizado, e o adensamento do concreto foi efetuado de forma mecânica, utilizando-se vibrador de imersão. Os corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão e para ensaio de *push-out* permaneceram por 24 horas nas formas. Em seguida foram desmoldados e submetidos à cura úmida por 19 dias. Após a retirada da água, esperou-se 24 horas para a secagem dos modelos, antes da realização dos ensaios, totalizando 21 dias entre as datas de concretagem e ensaio. As Figuras de 36 a 39 ilustram alguns detalhes da confecção dos corpos-de-prova

Figura 36 - Formas antes do preenchimento com concreto



Fonte: Próprio autor

Figura 37 - Corpos-de-prova logo após sua concretagem



Fonte: Próprio autor

Figura 38 - Corpos-de-prova para ensaio de resistência à compressão



Fonte: Próprio autor

Figura 39 - Corpos-de-prova prismáticos logo após desmoldagem



Fonte: Próprio autor

3.2.2 Ensaio de resistência à compressão

Determinou-se a resistência à compressão dos concretos através das recomendações apresentadas na norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Os corpos-de-prova eram cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, moldados em três camadas, com a aplicação de 25 golpes em cada camada. Foram ensaiados aos 7 e 21 dias, por meio de compressão axial em prensa hidráulica com acionamento mecânico, do fabricante ELE, com célula de carga de 70 toneladas, no LEMC-UFCG (Figura 40).

Figura 40 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Próprio autor

3.2.3 Ensaio de *push-out*

Para o estudo da aderência entre as barras de aço e o concreto, optou-se por realizar o ensaio de *push-out*, utilizando-se corpos-de-prova prismáticos com 20 cm

de aresta e comprimento aderente igual a 2,5 vezes o diâmetro de cada barra utilizada (10, 12,5 e 16 mm). O ensaio seguiu as recomendações RILEM AAC 8.2 (1992). Foi utilizada prensa hidráulica, do fabricante LOSENHAUSEN, com aplicação de compressão axial e célula de carga de 40 tf, também localizada no LEMC-UFCG (Figura 41).

Figura 41 - Realização do ensaio push-out



Fonte: Próprio autor

O ensaio forneceu a força necessária para deslocamento da barra dentro do maciço de concreto, posteriormente utilizada para determinação da tensão de aderência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resistência à Compressão

A Tabela 6 a seguir apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão, realizados com ambos os concreto, aos 7 e 21 dias. Também é apresentada a relação entre a resistência média à compressão dos concretos com fibras ($f_{c21, CF}$) e sem fibras ($f_{c21, SF}$).

Tabela 6 - Resistências médias à compressão dos concretos estudados

Idade do Concreto (dias)	Resistência à Compressão (MPa)		$f_{c21, CF} / f_{c21, SF}$
	Concreto sem fibra	Concreto com fibra	
7	47,4	53,1	1,12
21	53,7	59,7	1,11

Fonte: Próprio autor

É possível notar que a incorporação de fibras à matriz de concreto resultou em um aumento de 12% e 11,2% nas resistências à compressão dos modelos aos 7 e 21 dias, respectivamente.

A adição de fibras de aço ao concreto tem como principal finalidade o aumento da ductilidade e da tenacidade, bem como um melhor controle da fissuração das peças, e não o aumento da resistência do compósito. Portanto, o incremento na resistência obtido neste trabalho foi satisfatório.

Um fato interessante observado nos ensaios é que, ao contrário dos corpos-de-prova de concreto sem fibra, nos modelos com presença de fibra a ruptura ocorreu

sem que quase ocorresse destacamento de placas de concreto. As fibras são capazes de manter uma coesão e parte da integridade do corpo-de-prova. Pode-se considerar esse fato como um indício de aumento de ductilidade do concreto (Figura 42).

Figura 42 - Corpos-de-prova após ruptura: sem fibra à esquerda e com fibra à direita.



Fonte: Próprio autor

4.2 Tensão de Aderência

4.2.1 Efeito do confinamento do concreto

A ruptura de todos os corpos-de prova se deu por arrancamento, característica típica em modelos com concreto confinado. A Tabela 7 apresenta os valores de recobrimento (c) e a relação entre o recobrimento e o diâmetro (c/ϕ), para cada barra. A literatura aponta que, para esta relação, valores maiores que 5 indicam confinamento no trecho da barra aderida ao concreto.

Tabela 7 - Valores de cobrimento utilizados

ϕ (mm)	Cobrimento c (cm)	c/ ϕ
10,0	9,500	9,50
12,5	9,375	7,50
16,0	9,200	5,75

Fonte: Próprio autor

4.2.2 Efeito da presença de fibras

A presença de fibras na mistura resultou em notável melhoria da tensão máxima de aderência, como demonstrado na Tabela 8. Ainda, é apresentada a relação entre a tensão máxima dos concretos com fibras ($T_{\max,CF}$) e a dos concretos sem fibras ($T_{\max,SF}$)

Tabela 8 - Valores de tensão máxima de aderência dos concretos produzidos

Diâmetro da barra (mm)	Tensão máxima de aderência (MPa)		$T_{\max,CF} / T_{\max,SF}$
	Concreto sem fibra	Concreto com fibra	
10,0	23,22	32,88	1,42
12,5	25,25	32,88	1,30
16,0	25,95	33,00	1,27

Fonte: Próprio autor

Através da realização do ensaio de *push-out* não foi possível afirmar que as fibras auxiliaram no controle de fissuração, pois em ambos os casos (presença e ausência das fibras) ou as fissuras são ausentes ou apareceram de forma imperceptível, característica da ruptura por arrancamento.

4.2.3 Efeito do diâmetro das barras

O diâmetro da barra influenciou na tensão máxima de aderência apenas para o concreto sem fibra: aumentos no diâmetro resultaram em ligeiros aumentos das tensões máximas. Analisando o valor de T_{max} das barras de 12,5 mm em relação às barras de 10 mm, nota-se um aumento de 9%. Para as barras de 16 mm houve aumento da tensão de apenas 3%, em relação às barras de 12,5 mm.

O fato de, nesta pesquisa, a tensão máxima de aderência aumentar com o aumento do diâmetro da barra contraria a maior parte das pesquisas existente, mas corrobora os resultados obtidos por Barbosa (2001) e Santana (2014). Para os casos em que a tensão máxima diminui com o aumento do diâmetro, a explicação dada baseia-se no fato de que, numa zona de transição aço-concreto com barras de maior diâmetro, aliada às maiores dimensões das nervuras, mais água de amassamento é retida na face inferior da barra, enfraquecendo a ligação. Entretanto, para concretos de alto desempenho, pode-se sugerir que o baixo fator água-cimento da mistura e a adição mineral não propiciam a retenção de água no entorno da barra.

No que diz respeito ao concreto reforçado com fibras metálicas, as fibras parecem neutralizar o efeito do diâmetro da barra na tensão de aderência.

4.2.4 Comparação com valores teóricos (NBR 6118)

Com o intuito de comparar os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa com os valores teóricos, obtidos pela expressão da NBR 6118 (ABNT, 2014), foi criada a Tabela 9. Para determinação da tensão máxima de aderência, segundo a ABNT NBR 6118:2014, foi adotada a resistência à compressão obtida experimentalmente aos 21 dias. Pode-se observar que os valores calculados são muito inferiores às tensões máximas experimentais, resultando em apenas 15 a 21% dos resultados experimentais, tanto para o concreto com fibras como para o sem fibras. Esse mesmo fato já foi observado por outros autores, a exemplo de Santana (2014), Simplicio (2008) e Melo (2016).

Tabela 9 - Valores experimentais e teóricos (NBR 6118) de tensão máxima de aderência

	Φ (mm)	f_{cm} (MPa)	T_{max} (MPa)
Experimental – Sem fibras	10,0	53,7	23,22
	12,5		25,25
	16,0		25,95
Experimental – Com fibras	10,0	59,7	32,88
	12,5		32,88
	16,0		33,00
Teórico (NBR 6118:2014) – Sem fibras	10,0	53,7	4,80
	12,5		4,80
	16,0		4,80
Teórico (ABNT NBR 6118:2014) – Com fibras	10,0	59,7	4,83
	12,5		4,83
	16,0		4,83

Fonte: Próprio autor

Como a norma não especifica o deslizamento relativo à tensão de aderência calculada, é possível que a diferença entre os valores teóricos e experimentais seja decorrente da maior cautela da norma quanto a esses deslocamentos, quando comparada aos deslizamentos que fornecem as tensões máximas de aderência obtidas experimentalmente.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo estudar, experimentalmente, a aderência entre barras de aço e concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço. Para isso, foi realizada análise comparativa das tensões máximas de aderência, utilizando-se como variáveis a ausência ou presença de fibras na mistura e o diâmetro da barra. Foi analisada, ainda, a influência das fibras metálicas na resistência à compressão do concreto. Os resultados experimentais de ensaios de *push-out* foram comparados entre si, com valores teóricos e com valores obtidos por outros pesquisadores.

Os dados experimentais apresentaram oscilações ligadas ao ensaio, fato também registrado por outros autores. A falta de consenso ainda existente sobre as metodologias dos ensaios e sobre as dimensões e formas dos corpos-de-prova, dificulta a comparação entre pesquisas.

Nos tópicos que seguem, são apresentadas as conclusões que podem ser retiradas a partir dos resultados obtidos neste estudo.

5.1.1 Influência das fibras na resistência à compressão dos concretos

O teor de fibra utilizado proporcionou um aumento da resistência à compressão do concreto de 12% e 11,2% aos 7 e 21 dias, respectivamente. Além disso, foi identificado um indício de aumento da ductilidade no concreto fibroso, pois a ruptura do corpo-de-prova aconteceu sem que houvesse destacamento de placas de concreto.

5.1.2 Efeito das fibras na tensão máxima de aderência

A tensão máxima de aderência apresentou um aumento médio de 33% para o concreto com adição de fibras em relação ao concreto sem fibras. Quanto menor o diâmetro da barra, maior foi o incremento apresentado.

5.1.3 Efeito do diâmetro da barra na tensão máxima de aderência

- Nos corpos-de-prova sem adição de fibra, a variação do diâmetro influenciou a tensão de aderência máxima. À medida que o diâmetro aumenta a tensão máxima tende a aumentar de maneira sutil;
- Para os corpos-de-prova com fibra, a variação do diâmetro não se mostrou influenciadora da tensão máxima.

5.1.4 Comparação dos valores experimentais com valores teóricos

- Os valores teóricos calculados pela expressão da NBR 6118 (ABNT, 2014) para a tensão máxima de aderência foram significativamente inferiores aos valores experimentais, subestimando a capacidade aderente entre concretos de alto desempenho e barras de aço.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

O comportamento da aderência ainda é rodeado por lacunas a serem preenchidas, especialmente para os concretos de alto desempenho com reforço de fibras metálicas. Diversas variáveis, não abordadas nessa pesquisa, influenciam a aderência concreto-aço, como velocidade e tipo de carregamento, posição da concretagem, comprimento da fibra, etc. Pensando nisso, seguem sugestões para futuras pesquisas:

- Estudar a influência do fator de forma e do comprimento da fibra de aço;
- Estudar a influência de diferentes resistências à compressão;
- Comparar os resultados obtidos através de diferentes tipos de ensaio;
- Estudar o efeito da adição de diferentes teores de fibra;
- Estudar a influência de outros diâmetros de barras de aço;
- Realizar simulação numérica e comparar os resultados aferidos com os resultados experimentais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2004). ACI 408R-03: *Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension*. In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, 2003;

_____. ACI 544.1R-96: *State-of-the-art report on fiber reinforced concrete*. In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1982). *NBR 7477:1982: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado*. Rio de Janeiro.

_____. *NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro, 1998;

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

_____. *NBR 15530:07: Fibras de aço para concreto – Especificações*. Rio de Janeiro, 2007;

_____. *NBR 6118:14: Projeto de estruturas de concreto – procedimento*. Rio de Janeiro, 2014;

_____. *NBR 8953:15: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência*. Rio de Janeiro, 2015.

BARBOSA, M. T. G. *Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência*. 203p. Tese de Doutorado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre reinforced cementitious composites*. Essex, Inglaterra. Elsevier Science Publishers LTD, 1990.

BORGES, J. U.A. G., *Análise do Comportamento de Vigas de Concreto de Alto Desempenho por meio da Mecânica da Fratura*. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BOSCO, V. I. D. et al. *Comparativo experimental entre os métodos de ensaios pull-out e push-out para determinação da tensão de aderência aço-concreto*. In: 54º Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió/AL. Anais do 54º CBC. São Paulo/SP: IBRACON, 2012.

BUCHAIM, R. *A influência da não-linearidade física do concreto armado na rigidez à flexão e na capacidade de rotação plástica*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 2001. 260 p.

CAETANO, L. F. *Estudo do Comportamento da Aderência de Elementos de Concreto Armado em Condições Extremas*. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

CASTRO, C. M. *Concreto de alto desempenho: estudo da aderência com a armadura sob ações repetidas*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 155 p, 2002.

CHAN, Y.; CHEN, Y.; LIU, Y. *Effect of consolidation on bond reinforcement in concrete of different workabilities*. ACI Materials Journal, v.100, n.4, p.294-301, 2003.

DUCATTI, V. A.; AGOPYAN, V. *Concreto de elevado desempenho: Estudo da aderência com a armadura*. Boletim Técnico BT/PCC/113 do Departamento de

Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

DUMÊT, T. B. *Aderência de cordoalhas em concretos de alta resistência com e sem fibras de aço*. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

ELIGEHAUSEN, V., POPOV, EGOR P., BERTERO, VITELMO, V. *Local Bond-slip Relationship of Deformed Bars Under Generalized Excitations* - Report no UCB/EERC 83/23, University Of California, College of Engineering, Earthquake Engineering Research Center, Berkley California, USA, 1983.

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

FIGUEIREDO, A. D.; CHAMA NETO, P. J.; FARIA, H. M. *A nova normalização brasileira sobre fibras de aço*. *Concreto & Construções*, São Paulo, v. 36, n. 50, p. 67-76, abr./maio/jun. 2008.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto reforçado com fibras*. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. 248 p. São Paulo, 2011.

FU, X.; CHUNG, D. D. L. *Decrease of the bond strength between rebar and concrete with increasing curing age*. *Cement and Concrete Research*, v.28, n.2, p.1499-1503, 1998

FUSCO, P.B. *Técnica de armar as estruturas de concreto*. Pini. São Paulo, 1995.

HADADE, M. A. S. *Comportamento de vigas levemente armadas em concreto de alto desempenho*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2008.

HAMAD, B. S.; MACHAKA, M.F. *Effect of transverse reinforcement on bond strength of reinforcing bars in silica fume concrete*. *Materials and Structures*, v.32, n.6, p.468-476, 1999.

LEONHARDT, F.; MÖNNIG, E. *Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado*. v.1. Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELO, F. M. *Estudo experimental da aderência entre barras de aço e concreto*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

MILLER, K. P. *Estudo da fluência em vigas de concreto reforçado com fibras de aço, com aplicação de conceitos da mecânica da fratura*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

ORANGUN, C.O.; JIRSA, J.O.; BREEN, J.E. *A reevaluation of test data on development length and splices*. *ACI Journal Proceedings*, v.74, n.3, p.114-122, Mar. 1977.

RESENDE, F. M. *Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e de alto desempenho*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2003.

RIBEIRO, J. L. D. *Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência de barras nervuradas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

RILEM RC5, TC9-RC, *Bond test for reinforcement steel – Bond test*, RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, 1982.

RILEM TC. AAC 8.2 *Push-out test for reinforcement*. RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, E & FN SPON, 1994.

SANTANA, I. V. *Estudo da influência das fibras metálicas no comportamento da aderência entre barras de aço e concretos de diferentes classes de resistência*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014, 246p.

SHAH, S.P. *High-performance concrete: controlled performance concrete*. Magazine of Concrete Research, v.49, n.178, p.1-3, Mar. 1997.

SIMPLÍCIO, M. A. de S. *Estudo sobre a aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

TOJAL, T. L. *Contribuição ao estudo da aderência de barras de aço em concreto autoadensável reforçado com fibras metálicas*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, 2011.

VIEIRA, F. M. P. *Estudo do comportamento da aderência das barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microssilica*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

WALTON, P. L., MAJUMDAR, A. J. *Cement-based composites with mixtures of different types of fibres*. Garston, Watford: Building Research Station, 1975.

XU, F. et al. *Experimental study on the bond behavior of reinforcing bars embedded in concrete subjected to lateral pressure*. Journal of Materials in Civil Engineering, v.24, n.1, p.124-133, 2012.