



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

**ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO DE ALTO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS**

YANA DE MEDEIROS SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

2017

YANA DE MEDEIROS SILVA

ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO DE
ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS

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

Orientador: Prof. Dr. MARCOS ANTÔNIO DE SOUZA SIMPLÍCIO

CAMPINA GRANDE - PB

2017

YANA DE MEDEIROS SILVA

**ESTUDO DA ADERÊNCIA ENTRE BARRAS DE AÇO E CONCRETO
DE ALTO DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS METÁLICAS**

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 Antônio De Souza Simplício.

TCC defendido e aprovado em: ____/____ de 2017.

BANCA EXAMINADORA

(Assinatura): _____

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício

(Orientador)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Prof. Dr. José Bezerra da Silva

(Examinador Externo)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

(Assinatura): _____

Profª. Ma. Cássia Mendonça dos Anjos

(Examinador Interno)

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmãos, dedico todas minhas conquistas. Minha família representa todo o amor e força que preciso para continuar seguindo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, responsável por permitir todas minhas conquistas e por me acolher em todos os momentos.

Aos meus pais, Humberto e Adriana, anjos que Deus me enviou. Sem eles, que abdicaram de seus sonhos para realizar os meus, não teria chegado até aqui. A vocês, minha eterna gratidão.

Aos meus irmãos, Fernanda e Gabriel, que em todas as situações me apoiaram com muito amor e carinho.

Ao meu noivo, Everton, por todo companheirismo e suporte nos momentos que precisei, tornando toda minha jornada mais fácil.

A toda minha família, que de longe torceram e torcem por cada degrau alcançado em minha vida.

Ao meu professor orientador, Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício, pela oportunidade, confiança e conhecimentos cedidos durante todo o curso. E a todos os professores que juntos fizeram parte de minha formação.

Aos funcionários do Laboratório de Estrutura e Materiais de Construção (LEMC), Edvaldo e Conrado, por todo auxílio e suporte na execução dos ensaios.

Aos engenheiros Artur, Alafim, Edgar e a arquiteta Tayane, pelos conhecimentos compartilhados no estágio e por todo suporte de material que precisei para execução desta pesquisa.

A minha amiga Bruna, que desde o início do curso compartilha esta caminhada comigo. E aos demais amigos que tornaram os anos da graduação mais fáceis pelo companheirismo e ensinamentos divididos.

RESUMO

O concreto consiste em um dos materiais mais empregados na construção civil. Diversos avanços vêm sendo realizados a fim de se obter um concreto com melhores características e um deles consiste no concreto de alto desempenho (CAD). A partir de aditivos e adições este tipo de concreto atinge excelentes propriedades, em que, uma das formas de obtenção destes resultados consiste na incorporação de fibras de aço a matriz cimentícia. Entretanto, existem diversas lacunas a serem preenchidas no que se refere às suas propriedades, como a aderência, que representa um dos fatores primordiais para um bom funcionamento do concreto e deve ser cautelosamente analisada. Diante do contexto, este trabalho consiste em propor uma análise da influência da adição de fibras de aço na aderência aço-concreto através do ensaio *push-out test*. Para esta análise foram confeccionados corpos de prova prismáticos com aresta de 20 cm e comprimento de ancoragem de $2,5\phi$, utilizando barras de aço nervuradas nos diâmetros de 10, 12,5 e 16 mm e concreto dosado para um f_{ck} correspondente a 60 MPa. Além do efeito das fibras, foi avaliada a correlação existente entre o diâmetro da barra e a tensão máxima de aderência. Através dos resultados obtidos, foi possível constatar que a adição de fibras de aço melhora a aderência, bem como a resistência à compressão do concreto, no qual, o diâmetro que apresentou melhores resultados foi o de 16 mm. Além disso, foi possível concluir que os resultados teóricos, fornecidos pela expressão da ABNT NBR 6118/2014 mostraram-se inferiores aos obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: aderência, fibra, concreto

ABSTRACT

Concrete consists of one of the materials most used in construction. Several advances have been made in order to obtain a concrete with better characteristics and one of them consists of high performance concrete (CAD). From additives and additions, this type of concrete achieves excellent properties, where one of the ways of obtaining these results is the incorporation of steel fibers into the cementitious matrix. However, there are several gaps to be filled in regard to their properties, such as bond, which is one of the key factors for a smooth operation of the concrete and should be carefully considered. Considering the context, this work consists in proposing an analysis of the influence of the addition of steel fibers in the steel-concrete bond through the push-out test. For this analysis prismatic test pieces with a 20 cm edge and 2.5ϕ anchorage length were made using steel bars in the diameters of 10, 12.5 and 16 mm and concrete compressive strength of 60 MPa. In addition to the effect of the fibers, the correlation between the diameter of the bar and the maximum bond strength was evaluated. Through the results obtained, it was possible to verify that the addition of steel fibers improves the bond strength as well as the compressive strength of the concrete, where the diameter that presented the best results was 16 mm. In addition, it was possible to conclude that the theoretical results, provided by the ABNT NBR 6118/2014 expression were inferior to those obtained experimentally.

Key-words: bond, fiber, concrete.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classes de resistência de concretos estruturais segundo ABNT NBR 6118	3
Tabela 2 - Classes diferentes de concreto de alto desempenho	4
Tabela 3 - Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto	10
Tabela 4 - Módulo de elasticidade das fibras	19
Tabela 5 - Resumo do comportamento da aderência entre aço e concreto com fibras	28
Tabela 6 - Resistência de aderência das amostras de arrancamento com barras lisas	29
Tabela 7 - Resistência de aderência das amostras de arrancamento com barras nervuradas	30
Tabela 8 - Composição do concreto	41
Tabela 9 - Características geométricas das barras	42
Tabela 10 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização dos agregados	44
Tabela 11 - Características dos agregados	52
Tabela 12 - Resistência à compressão do concreto	53
Tabela 13 - Tensão máxima de aderência do concreto	54
Tabela 14 - Variação da tensão máxima para os concretos sem e com fibra	57
Tabela 15 - Resultados experimentais e teóricos	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das fibras segundo BISFA.....	6
Figura 2 - Aspecto das (a) fibras de polipropileno de superfície lisa e (b) fibras de polipropileno corrugadas	8
Figura 3 - Alguns tipos de fibras de aço.....	9
Figura 4 - Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das microfissuras	11
Figura 5 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões.....	12
Figura 6 - Representação de tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz após desligamento parcial da fibra.....	13
Figura 7 - Curvas típicas de tensão de tração x deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras.....	15
Figura 8 - Compósitos reforçados com volumes de fibras (VF) abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão	16
Figura 9 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico	17
Figura 10 - Curva tensão de cisalhamento versus escorregamento	21
Figura 11 - Aderência por adesão	22
Figura 12 - Aderência por atrito.....	23
Figura 13 - Aderência mecânica.....	24
Figura 14 - Superfície relativa da nervura.....	25
Figura 15 - Variação da tensão de aderência com a resistência à compressão.....	27
Figura 16 - Prisma para ensaio de arrancamento e respectivas variações da tensão de aderência ao longo do comprimento	32
Figura 17 - Prisma para ensaio de arrancamento	33
Figura 18 - Posição da amostra para o ensaio push-out em AAC.....	34
Figura 19 - Desenho esquemático do método de ensaio (a) Pull-out, (b) Push-in e (c) ensaio composto pelos dois.....	35
Figura 20 - Ensaio de viga para $\varnothing < 16$ mm	36
Figura 21 - Ensaio de viga para $\varnothing \geq 16$ mm	37
Figura 22 - Ensaio de extremidade de viga	37
Figura 23 - Esquema geral do ensaio desenvolvido por Fusco	38
Figura 24 - Ensaio de tirante – dimensões em mm	39
Figura 25 - Características das fibras	43
Figura 26 - Fibras de aço.....	44
Figura 27 - Dimensão dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out	45
Figura 28 - Fôrmas utilizadas para confecção dos corpos de prova.....	46
Figura 29 - Detalhes da adequação da zona de aderência e posicionamento da barra	46
Figura 30 - Corpos de prova moldados	47
Figura 31 - Corpos de prova submetidos ao processo de cura	47
Figura 32 - Slump Test.....	48
Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão	49
Figura 34 - Ensaio <i>push-out</i>	50
Figura 35 - Curvas granulométricas dos agregados	51
Figura 36 - Ruptura dos corpos de prova (a) com fibra e (b) sem fibra	54
Figura 37 - Relação entre o diâmetro da barra e a tensão máxima de aderência.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAC Concreto celular autoclavado
ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI American Concrete Institute
APULOT Appropriate Pull-out Test
BISFA The Internacional Bureau For The Standardisation of Man-Made Fibres
CAD Concreto de alto desempenho
CAGEPA Companhia de Água e Esgotos da Paraíba
CEB Comité Euro-Internacional du Béton
CF Concreto com fibras
CP Cimento Portland
CR Concreto de referência (sem fibras)
CRF Concreto reforçado com fibras
CRFA Concreto reforçado com fibra de aço
CRFAP Concreto reforçado com fibras de aço e polipropileno
CRFP Concreto reforçado com fibras de polipropileno
CRFV Concreto reforçado com fibras de vidro
DMC Dimensão máxima característica
FERBASA Companhia de Ferro-Ligas da Bahia
FIP Fédération Internationale de la Précontrainte
GFRC Concrete reinforced glass fibers
LEMC Laboratório de Estrutura e Materiais de Construção
MPa Megapascal
NBR Norma Brasileira Registrada
NM Norma Mercosul
PFRC Concrete reinforced polypropylene fibers
PFRC Concrete reinforced polypropylene fibers
RILEM Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages
SFRC Concrete reinforced steel fibers
UFCG Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

τ_b	Tensão de aderência
τ_{\max}	Tensão máxima de aderência
F_t	Força de arrancamento
u	Perímetro
ℓ	Comprimento de ancoragem
\emptyset	Diâmetro
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto
R_{st}	Força de tração na armadura
a	Comprimento da viga
z	Distância entre a resultante de tração e a resultante de compressão
η	Coefficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva
D	Diâmetro
$\Delta L_{\text{médio}}$	Distância média entre as nervuras
n	Número de fissuras
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto
V_f	Volume de fibras
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{bd}	Resistência de aderência de cálculo da armadura passiva
f_{ctd}	Resistência à tração de cálculo do concreto
$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração característica inferior do concreto
f_{ctm}	Resistência média do concreto à tração
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O concreto possui diversas características que lhe garantem o posto de um dos materiais mais importantes e utilizados na construção civil. Reconhecido por sua versatilidade, que permite sua utilização tanto para construção de estruturas esbeltas quanto massivas, este material vem sendo estudado há bastante tempo (GARCEZ, 2005).

Dentre as vantagens do concreto, pode-se citar sua resistência à compressão, sua rigidez, durabilidade e baixo custo, características estas que fazem com que seu uso tenha sido intensificado ao longo dos anos. Porém, além das vantagens citadas, o mesmo apresenta alguns pontos negativos, que fazem com que estudos sejam realizados cada vez mais a fim de melhorar suas propriedades. Dentre os pontos negativos, pode-se destacar a baixa resistência à tração e a pequena capacidade de deformação, característica de um material frágil.

É nesse contexto que várias tecnologias vêm sendo desenvolvidas, a fim de se obter um concreto com melhores propriedades. Um dos avanços nesse ramo refere-se ao concreto de alto desempenho (CAD), que com a incorporação de aditivos e adições, tem se tornado um concreto com melhores características, sendo utilizado cada vez mais na construção civil. Como cita Silva (2010), algumas das vantagens econômicas e estruturais deste são: redução das seções dos elementos de concreto, baixa porosidade, baixa permeabilidade, elevada resistência ao desgaste e menor tempo e custo de manutenção. No entanto, mesmo com tantas vantagens, a baixa ductilidade representa um fator negativo na utilização do CAD. Esta desvantagem dos concretos de alta resistência pode ser superada com a introdução de fibras de aço em sua composição, transformando seu comportamento na ruína, de frágil em dúctil, semelhante ao dos concretos usuais (ARAÚZ, 2002).

Comparada aos outros tipos de fibras, a fibra de aço destaca-se por possuir alta resistência à tração e grande capacidade de aderência a matriz que a envolve, podendo ser facilmente deformada, o que conseqüentemente aumenta a tenacidade do compósito, como afirma Araújo (2002).

As fibras e barras de aço convencionais possuem diversos papéis a desempenhar nos concretos, entretanto, a combinação destes com o aço só é possível devido a aderência existente entre ambos. Logo, a aderência representa um dos fatores primordiais para um bom funcionamento do concreto e deve ser cautelosamente analisada, tendo em vista que a perda

desta propriedade está ligada a diversas variáveis, como resistência à compressão do concreto, diâmetro da barra de aço e adições, a exemplo das fibras metálicas.

Diante do exposto, fica clara a necessidade de se entender melhor as características do concreto de alto desempenho reforçado com fibras (CADRF), a fim de se obter melhor proveito deste excelente material da construção civil.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em, a partir dos dados experimentais, avaliar a influência da adição de fibras de aço ao concreto de alto desempenho, no comportamento da aderência.

1.1.2 Objetivos específicos

- avaliar a influência da adição de fibras de aço na resistência à compressão do compósito;
- verificar a influência do diâmetro da barra de aço na tensão de aderência;
- analisar o efeito da incorporação das fibras na tensão de aderência;
- analisar a forma de ruptura dos corpos-de-prova submetidos ao push-out test;
- comparar os resultados obtidos experimentalmente com outras pesquisas experimentais e com os valores teóricos, obtidos pela expressão da ABNT NBR 6118/2014.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Concreto de alto desempenho – CAD

Ao longo dos anos, acompanhamentos vêm sendo realizados cada vez mais nas estruturas de concreto, a fim de se obter resultados que possam servir de parâmetros para futuras melhoras nas suas características, como resistência, trabalhabilidade, entre outras. E foi nesse contexto, que surgiu o concreto de alto desempenho (CAD), que tem como principal característica os aditivos e adições que são incorporados à sua mistura, a fim de se obter um material com melhores propriedades. Com o desenvolvimento de aditivos superplastificantes mais eficientes e a maior utilização de adições minerais ao concreto, como a sílica ativa e o metacaulim, passou-se a utilizar concreto de alto desempenho (CAD) de forma mais acentuada nos últimos anos (SIMPLICIO, 2008).

Segundo a ABNT NBR 6118 (2014), os concretos podem ser classificados segundo sua resistência, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Classes de resistência de concretos estruturais segundo ABNT NBR 6118

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

Fonte: ABNT NBR 6118 (2014)

Aitcin (2000) classifica o concreto de alto desempenho de acordo com a resistência à compressão, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Classes diferentes de concreto de alto desempenho

Classe do Concreto	Resistência à Compressão (MPa)
Classe I	50 – 75 MPa
Classe II	75 – 100 MPa
Classe III	100 – 125 MPa
Classe IV	125 – 150 MPa
Classe V	Maior que 150 MPa

Fonte: Aitcin (2000)

O CAD é utilizado nos mais variados tipos de obras e em diversos países. Hoje, em algumas regiões brasileiras o CAD é empregado em pilares de edificações, em pontes e obras de arte especiais, peças pré-fabricadas, pisos e pavimentos ou em recuperações estruturais, entre outras (IBRACON, Isaia, 2005).

Porém, apesar das vantagens e ampla utilização deste material, Simplício (2008), cita que há alguns fatores que devem ser analisados cautelosamente no seu emprego, como a sua baixa ductilidade, principalmente para resistências acima de 90 MPa. E uma alternativa para minimizar esse comportamento frágil do concreto, consiste na incorporação de fibras metálicas à sua mistura, pois, melhora várias características, e dentre elas, a ductilidade. Estudos realizados mostram a possibilidade de substituição total ou parcial da armadura de cisalhamento em vigas, pelas fibras metálicas.

Logo, de acordo com exposto, torna-se viável a incorporação de fibras ao concreto de alto desempenho, formando assim, o CADRF (concreto de alto desempenho reforçado com fibras).

2.2 Concreto reforçado com fibras (CRF) - compósito

Os concretos reforçados com fibras são denominados geralmente por compósitos. Este termo é comumente utilizado para a classe de materiais constituídos pela combinação de dois ou mais elementos, que apresentem propriedades químicas e físicas diversas, e que mesmo atuando em conjunto, podem ser identificados separadamente. O concreto reforçado com

fibras corresponde a uma classe de compósitos que é composta por uma matriz frágil e um tipo de reforço, as fibras.

De acordo com Callister (2002), o termo compósito está intimamente relacionado à existência de um material multifásico, que apresenta uma proporção considerável das propriedades das fases que o constituem, e algumas propriedades emergentes, resultado da associação destas fases.

Agarwal e Broutman (1990) definem o material compósito como um sistema, cujas propriedades derivam das especificidades dos materiais constituintes, tais como suas características e sua geometria.

Segundo Liao (1998), a utilização de materiais compósitos na construção civil não é recente, em que, há algumas décadas, essa medida já era analisada como uma alternativa aos materiais de construção convencionais e, mais recentemente, no reforço e recuperação de estruturas. Atualmente, tem-se como foco caracterizar e aperfeiçoar esses materiais, para que se obtenham melhores resultados em relação à resistência, durabilidade, baixo custo, entre outros aspectos.

A literatura apresenta alguns pontos negativos em relação à utilização dos materiais compósitos, como o comportamento mecânico complexo, decorrente de sua heterogeneidade e pontos relativos ao custo. Porém, não se deve avaliar em termos de custos, apenas o custo unitário de produção, mas também outros aspectos como economia no transporte, devido ao baixo peso, questões de durabilidade, entre outros fatores, que conjuntamente, atuam oferecendo melhores resultados e reduzindo assim, os custos ao longo do tempo, permitindo projetos cada vez mais eficazes.

Santiago (2002), argumentando sobre compósitos de matriz polimérica, ressalta que, além do custo elevado, da escassez de normas e da falta de informações sobre sua durabilidade, a utilização de compósitos pode ser apontada como uma importante desvantagem, levando-se em conta a falta de cobertura do uso de materiais inovadores por parte de agentes seguradores.

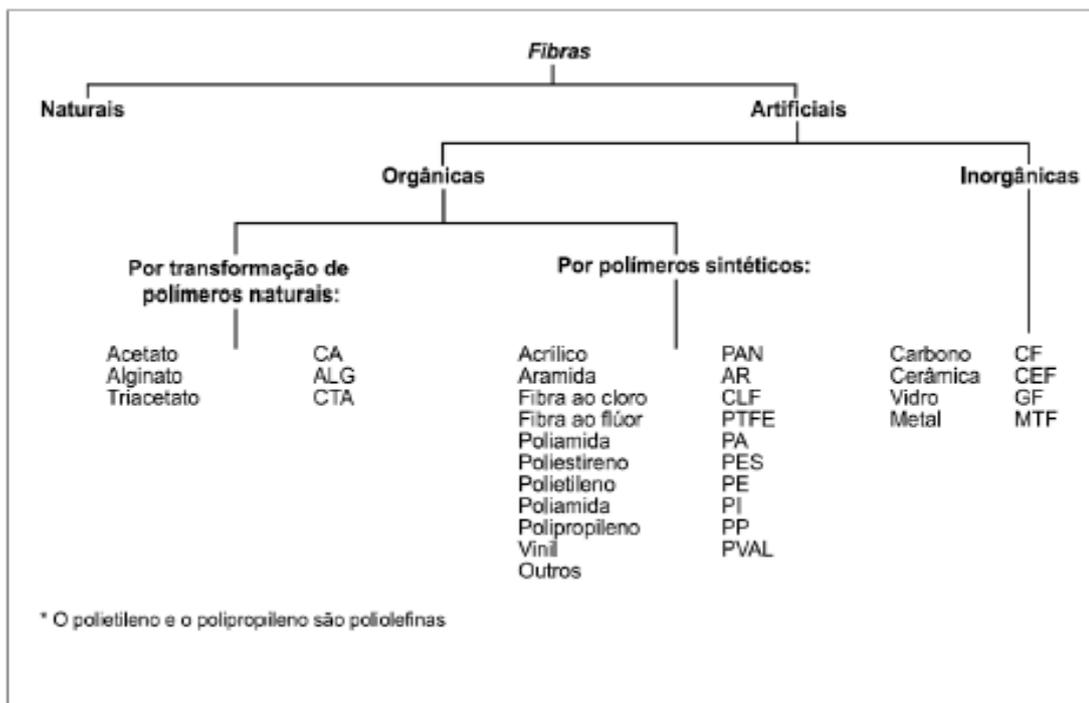
Portanto, torna-se necessário o estímulo para o desenvolvimento de pesquisas que detalhem o comportamento dos compósitos ao longo do tempo, bem como seu desempenho a partir das solicitações que são impostas as estruturas, permitindo assim, que se obtenham resultados cada vez mais satisfatórios, indicando as reais vantagens e desvantagens desses novos materiais, que vem sendo cada vez mais utilizados na construção civil.

2.3 Fibras

Existe uma grande variedade de fibras que pode ser utilizada para reforçar matrizes frágeis. A escolha depende das características que se deseja fornecer ao compósito (ACETTI E PINHEIRO, 2000).

De acordo com o BISFA, as fibras podem ser classificadas de acordo com a Figura 1:

Figura 1 - Classificação das fibras segundo BISFA



Fonte: Maccaferri, Manual Técnico (2009)

Diversos tipos de fibras estão disponíveis para uso comercial e experimental, dentre elas, as mais utilizadas para reforço das matrizes cimentícias, são:

- Fibras naturais: possuem tendência natural para se formarem e são encontradas facilmente em meio natural, como as fibras de sisal e coco.
- Fibras sintéticas: correspondem aquelas fabricadas pelo homem, passando por diversos processos tecnológicos, exemplo das fibras de aramida e polipropileno.
- Fibras de aço: referem-se aquelas produzidas a partir de fios de aço trefilados, em comprimentos e diâmetros variados.

2.3.1 Fibras naturais

Entre as fibras naturais que são utilizadas para reforço da matriz cimentícia, pode-se destacar as fibras de sisal, bagaço da cana-de-açúcar, entre outras.

No quesito ambiental e econômico, é vantajosa a utilização de fibras naturais, devido a variáveis como o custo reduzido, o baixo consumo de energia necessário para sua produção e o caráter renovável do material de origem. No entanto, em relação à durabilidade dos concretos reforçados com este tipo de fibra, têm-se observado problemas devido à falta de estabilidade dimensional e da possibilidade de degradação em curto espaço de tempo das fibras em presença de umidade (TEZUKA, 1989).

2.3.2 Fibras sintéticas

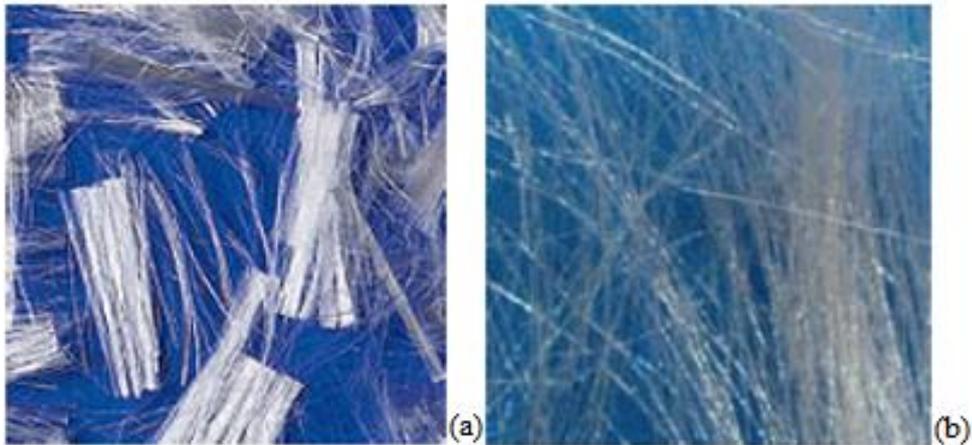
As fibras sintéticas foram desenvolvidas inicialmente com o intuito de aprimorar as características já obtidas com as fibras naturais, e, na medida em que suas aplicações foram crescendo, novas tecnologias vem sendo empregadas em sua produção.

Podem ser destacadas como as principais fibras sintéticas: acrílicas, de aramida, de nylon, poliéster e polipropileno. Porém, muitas destas não são utilizadas para reforço da matriz cimentícia, existindo poucas pesquisas a respeito. Em contrapartida, fibras como a de polipropileno são muito utilizadas para este fim, sendo encontradas facilmente no mercado, onde suas propriedades e uso são cada vez mais estudados.

As fibras de polipropileno possuem baixo módulo de elasticidade, grande capacidade de deformação, boa resistência aos álcalis e baixo custo (GARCEZ, 2005).

Atualmente, fibras com superfície corrugada estão sendo fabricadas com o intuito de incrementar a aderência, buscando melhorar a resistência ao impacto de concretos (FITESA, 2017). A Figura 2 ilustra o aspecto das fibras de polipropileno de superfície lisa (a) e corrugadas (b).

Figura 2 - Aspecto das (a) fibras de polipropileno de superfície lisa e (b) fibras de polipropileno corrugadas



Fonte: Fitesa (2017)

2.3.3 Fibras de aço

A fibra de aço merece destaque quando o quesito é aplicação de material de reforço, sendo a mais utilizada em argamassas e concretos. Cánovas (1997) relaciona este fato à elevada resistência mecânica, o alto módulo de elasticidade, à boa aderência com a pasta de cimento, bem como à facilidade de mistura na massa de concreto fresca que esta fibra proporciona.

Balaguru e Shah (1992) salientam que o propósito da adição de fibras de aço em matrizes de concreto, é o de incorporar melhores características mecânicas ao compósito, fazendo com que o controle do mecanismo de fissuração seja maior, além de melhorar outros aspectos como a resistência ao cisalhamento e à flexão.

No Brasil, foi elaborada uma norma de especificação para fibras de aço, a ABNT NBR 15530:2007, com determinação da tipologia e classificação das fibras de aço, segundo o fator de forma e a resistência do aço (FIGUEIREDO, 2008).

Diversos tipos de fibras podem ser encontradas no mercado, retas, onduladas ou torcidas, como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Alguns tipos de fibras de aço



Fonte: Weiler (1996)

De acordo com a norma, são previstos três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica:

- a) Tipo A: fibra de aço com ancoragem nas extremidades
- b) Tipo C: fibra de aço corrugada
- c) Tipo R: fibra de aço reta

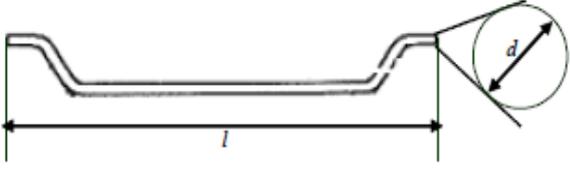
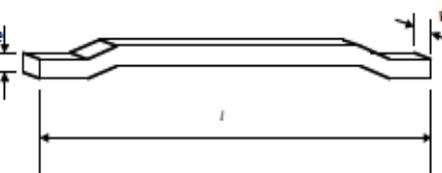
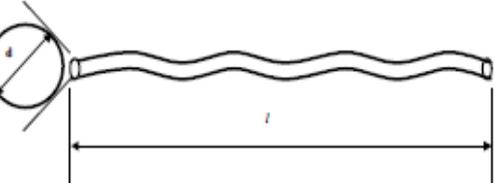
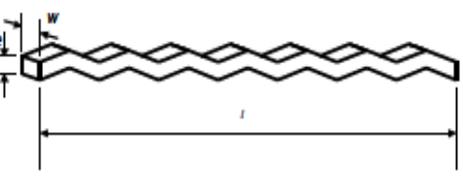
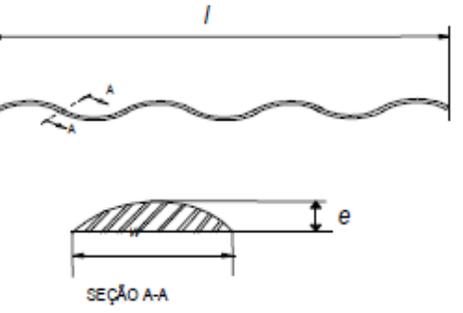
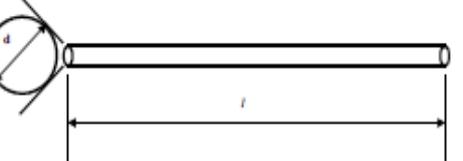
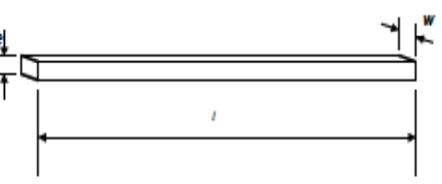
Figueiredo (2011), atenta para o fato que esta configuração geométrica, relacionada a cada um dos tipos de fibra de aço, não contempla o formato da seção transversal, mas somente o perfil longitudinal da fibra. O formato da seção transversal irá depender do tipo de aço utilizado na produção da fibra, que pode ser trefilado ou laminado (FIGUEIREDO, 2011).

A especificação brasileira também prevê uma classificação para as fibras de acordo com o tipo de aço que as deu origem:

- a) Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio
- b) Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio
- c) Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado

A Tabela 3 apresenta a configuração geométrica dos tipos e classes de fibras previstas pela norma.

Tabela 3 - 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	

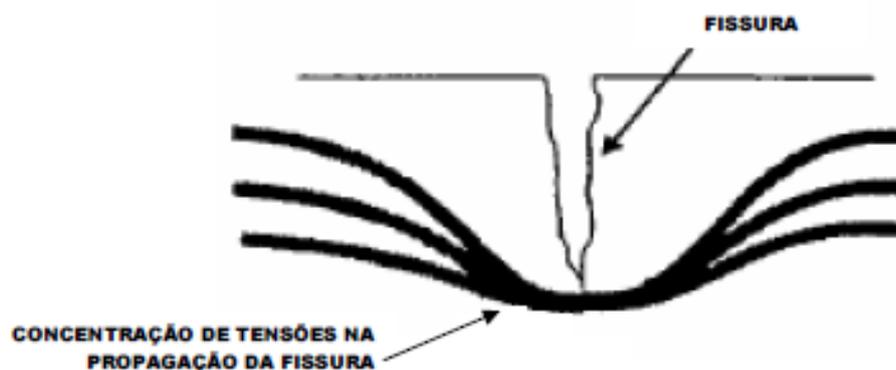
Fonte: Figueiredo et al. (2008)

2.4 A interação fibra-matriz

Mehta e Monteiro (1994), explicam que mesmo antes do concreto ser submetido a tensões externas, normalmente existem microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos. Pouca energia é necessária para que ocorra um aumento nestas fissuras, o que justifica a ruptura frágil do material, fato este que está diretamente ligado à baixa resistência a tração da matriz.

Analisando do ponto de vista microestrutural, quando o concreto é submetido a tração ou a flexão, há uma concentração de energia rápida nas extremidades das microfissuras existentes, o que implica em um aumento destas, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Mecanismo de concentração de tensões na tração no extremo das microfissuras

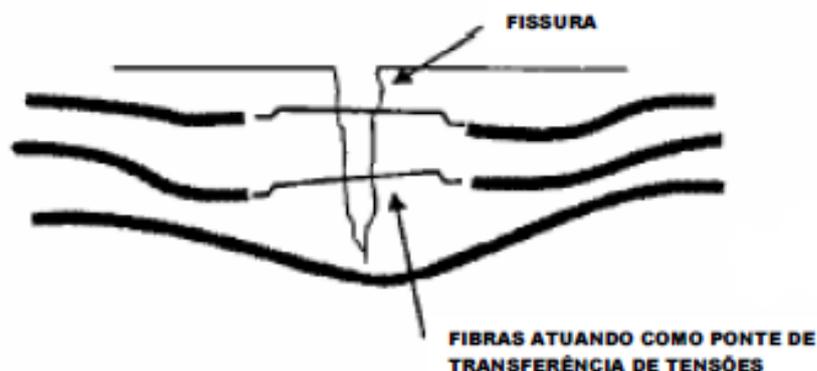


Fonte: Nunes e Agopyan (1998)

Para melhorar o desempenho de resistência à tração na matriz cimentícia, uma das soluções empregadas consiste na introdução de fibras nesta, como já citado anteriormente. Martineau et al. (2002) menciona que a utilização das fibras visa à imposição de obstáculos ao processo de fissuração, tendo em vista que estas agem como ponte de transferência dos esforços através da trinca, assegurando uma capacidade resistente após a abertura da mesma, propiciando uma expressiva redução da velocidade de propagação das fissuras no material, pela adoção de um comportamento não frágil.

A seguir, a Figura 5 ilustra como ocorre esse mecanismo.

Figura 5 - Mecanismo de reforço das fibras atuando como ponte de transferência de tensões



Fonte: Nunes e Agopyan (1998)

Diante do exposto, pode-se perceber que diferentemente dos concretos usuais, nos concretos reforçados com fibras, o surgimento das fissuras tende a ser retardado, em decorrência tanto da retração, quanto da absorção de parte das solicitações pelas pontes de transferência, o que permite uma fissuração mais distribuída.

Logo, torna-se necessária uma energia maior para a ocorrência de abertura e propagação das fissuras, o que torna a ruína do material menos frágil, conferindo-lhe então ganho de ductilidade, bem como de tenacidade, tendo em vista que a incorporação das fibras implica em um incremento na capacidade de absorção de energia do compósito. O índice capaz de indicar a capacidade de absorção de energia de um determinado material, para um determinado nível de deslocamento, é denominado tenacidade, que é também definida pela área sob o diagrama carga x deslocamento vertical (FERREIRA, 2002).

A distribuição aleatória no material consiste em uma das características benéficas do reforço proporcionado pelas fibras, fazendo com que toda peça seja reforçada, e não só um determinado local, caso das armaduras convencionais.

De acordo com Figueiredo (2011), existem situações em que o emprego somente das fibras na matriz cimentícia é necessário para que a estrutura tenha um bom desempenho, como no caso de pavimentos, onde as tensões de tração variam de posição ao longo do dia, fato este que ocorre devido às variações de temperatura ambiente. Já nos casos em que os esforços são bem localizados na peça, como em laje suspensa apoiada em viga, onde as tensões de tração se concentram na parte inferior, a utilização das fibras pode ser considerada inviável, tendo em vista que as mesmas não substituem as barras de aço de maneira

econômica. Entretanto, existem situações em que a ação combinada de fibras e armadura convencional é interessante, como no caso de tubos de concreto.

Existem dois estágios nos quais a eficácia das fibras na matriz cimentícia pode ser analisada, o estágio de pré e pós-fissuração, a seguir, uma breve abordagem sobre esse comportamento.

2.4.1 Comportamento pré-fissuração

No estágio de pré-fissuração, a transferência de tensões entre a fibra e a matriz ocorre por aderência (GARCEZ, 2005). Logo, durante o processo de aderência, a deformação na interface deve ser a mesma, ou seja, os deslocamentos longitudinais dos dois componentes devem ser equivalentes.

Tendo em vista a diferença de rigidez que existe entre a fibra e a matriz, tensões tangenciais surgem ao longo da superfície de contato, tensões estas, responsáveis por facilitar a transferência de parte da força aplicada para as fibras.

Quando as tensões tangenciais na interface, devidas ao carregamento, excedem a tensão de aderência entre a fibra e a matriz, inicia-se o processo de desligamento da fibra da matriz, com o surgimento de tensões de atrito na interface da zona de desligamento (GARCEZ, 2005). Essa transferência de tensão é exposta na Figura 6.

Figura 6 - Representação de tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz após desligamento parcial da fibra



Fonte: Bentur e Mindess (1990)

2.4.2 Comportamento pós-fissuração

Após a fissuração o atrito passa a ser o mecanismo dominante na transferência de tensões da matriz às fibras. Então, um processo denominado arrancamento das fibras, começa a surgir, devido o aumento da carga, que provoca os deslocamentos entre a fibra e a matriz. O gasto energético para o arrancamento da fibra é muito elevado, o que justifica a alta tenacidade do compósito (NUNES E AGOPYAN, 1998).

O mecanismo de arrancamento das fibras de aço tem sido um aspecto intensamente investigado, uma vez que este processo determina o comportamento do compósito após sua fissuração (GARCEZ,2005).

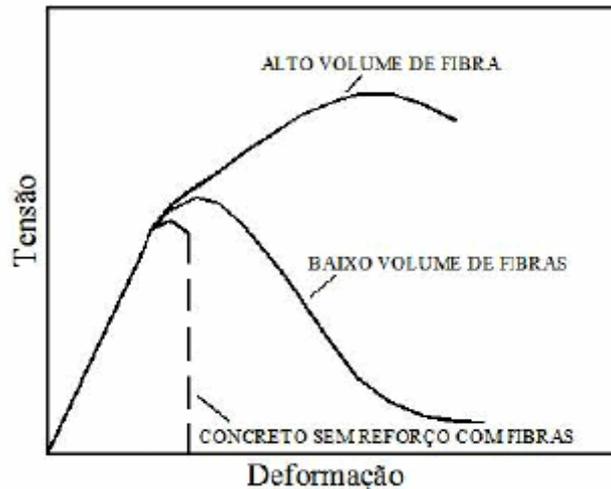
2.5 Parâmetros influentes na interação fibra-matriz

2.5.1 Teor de fibras

A eficiência do reforço conferida às fibras está intimamente relacionada ao teor utilizado, tendo em vista que quanto maior o teor, maior a quantidade que age na fissura como ponte de transferência de tensão. Garcez (2005), porém, ressalta para o fato que, a introdução de elevados teores de fibras, pode ocasionar em certas dificuldades na trabalhabilidade do material.

A Figura 7 ilustra as mudanças que ocorrem no comportamento plástico e na tenacidade do compósito, indicados pelo alongamento da curva tensão x deformação, mesmo quando são utilizados baixos teores de fibra.

Figura 7 - Curvas típicas de tensão de tração x deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras



Fonte: Bentur e Mindess (1990)

Diante da adição de fibras ao concreto, é possível que as resistências mecânicas do compósito aumentem consideravelmente, embora algumas pesquisas tenham avaliado experimentalmente a quantidade ideal a ser incorporada a concretos convencionais, sem que houvesse perda de trabalhabilidade da mistura, os resultados revelaram que, em alguns casos, os concretos reforçados com fibras não demonstraram um aprimoramento substancial nas suas propriedades mecânicas, podendo, inclusive, haver uma redução de resistência à compressão (QUININO, 2015).

A partir do exposto, surgiu então a definição do volume máximo de fibras, que representa a quantidade máxima de fibras a ser adicionada, tendo em vista que o aumento do teor das mesmas resulta em um incremento cada vez menor na resistência do compósito.

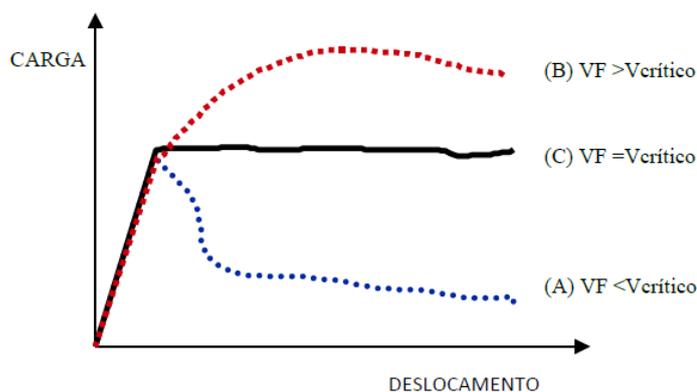
Naaman (2008) sugeriu que a melhor maneira de classificação dos compósitos à base de cimento reforçados com fibras deveria ter como base o desempenho, onde haveria duas classes principais. Na primeira, strain-softening, ocorreria perda de capacidade resistente progressiva pós-fissuração da matriz. A segunda, strain-hardening, ocorreria um ganho de capacidade resistente no compósito pós-fissuração da matriz.

Essa classificação está intimamente relacionada ao conceito de volume crítico de fibras, que pode ser definido como o teor correspondente que sustenta a mesma capacidade resistente para o compósito a partir da ruptura da matriz. Então, abaixo do volume crítico o

comportamento presente corresponde ao strain-softening, diferente do strain-hardening, que é aplicável a situações acima do volume crítico.

A Figura 8 ilustra o conceito exposto acima, apresentando curvas de carga por deslocamento obtido em ensaios de tração na flexão de prismas de concreto com fibras.

Figura 8 - Compósitos reforçados com volumes de fibras (VF) abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras durante o ensaio de tração na flexão



Fonte: Figueiredo (2000)

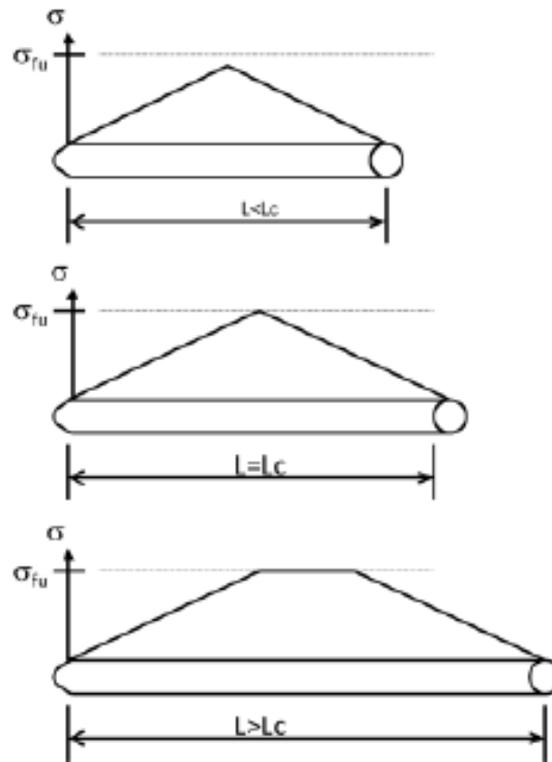
2.5.2 Geometria das fibras

Outro fator influente no desempenho pós-fissuração do concreto, corresponde a geometria das fibras. Segundo Naaman (2000, apud GAVA, 2006), as propriedades geométricas podem variar quanto à forma da seção transversal, o comprimento, o diâmetro, o diâmetro equivalente e a superfície.

Em relação ao comprimento, surge a definição de comprimento crítico. A definição do comprimento crítico está baseada no modelo que prevê a tensão entre a matriz e a fibra aumentando linearmente dos extremos para o centro da mesma (FIGUEIREDO, 2011). Tensão esta que, será máxima quando a tensão que a fibra for submetida se igualar a tensão de cisalhamento entre esta e a matriz. Callister (1997) declara que o comprimento crítico é função do diâmetro da fibra, de sua resistência última de tração, além da resistência de aderência fibra-matriz.

A Figura 9 ilustra as possíveis situações de distribuição de tensão na fibra em relação ao comprimento crítico.

Figura 9 - Distribuições possíveis de tensão ao longo de uma fibra em função do comprimento crítico



Fonte: adaptado de Bentur e Mindess (1990)

De acordo com a ilustração, podem-se analisar três situações:

1. $L < L_c$: Ocorre que a ancoragem não é suficiente para gerar tensões de escoamento ou ruptura nas fibras. Nesta situação, com o aumento da deformação e, conseqüentemente, da abertura da fissura, a fibra que está atuando como ponte de transferência de tensões será mais facilmente arrancada do lado que possui o menor comprimento embutido (Figueiredo, 2000).
2. $L > L_c$: Ocorre o travamento da fibra, impedindo seu arrancamento e gerando um aumento de tensão que atua na mesma, até que a tensão de ruptura seja alcançada.
3. $L = L_c$: Neste caso, a máxima tenacidade do compósito é obtida, como explica Garcez (2005).

Ainda acerca do comprimento crítico, é aconselhável que sejam utilizadas fibras de comprimento igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado

utilizado no concreto. Maidl (1991 apud FIQUEIREDO, 2005) acreditam que deve ser encontrada uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras, fazendo assim, com que as mesmas possam interromper com mais facilidade a fissura presente no compósito.

Outro fator que implica em mudança no comportamento pós-fissuração do compósito, está relacionado à seção transversal da fibra. Quanto menor a seção transversal, menor a área de contato da fibra com a matriz, logo, menor será a carga que a fibra suportará no processo de arrancamento.

Naaman (2000, apud GAVA, 2006) indicam que as fibras podem apresentar seções transversais diversas, que variam da forma circular as formas poligonais, regulares ou irregulares.

Tendo em vista a influência que o comprimento e a seção transversal da fibra têm no concreto, pesquisadores passaram a utilizar um parâmetro denominado fator de forma, que pode ser definido como a relação entre o comprimento da fibra e o diâmetro de uma circunferência virtual cuja área seria equivalente à seção transversal da fibra. Este índice é capaz de indicar a eficiência da fibra para a melhora da tenacidade do compósito (GARCEZ, 2005).

Segundo Mehta e Monteiro (1994), um fator de forma maior pode significar uma melhoria na resistência ao arrancamento da fibra, tendo em vista o aumento do comprimento de ancoragem, bem como um acréscimo no número de fibras que podem interceptar uma fissura.

Ensaçando concretos reforçados com fibras de aço de mesmo comprimento e fatores de forma diferentes, Nunes e Agopyan (1998) verificaram que há um aumento da tenacidade à flexão do compósito com o aumento do fator de forma, o que pode ser explicado pelo maior número de fibras presentes por unidade de volume da matriz.

2.5.3 Módulo de elasticidade e resistência mecânica das fibras

Segundo Tanesi e Agopyan (1997) o módulo de elasticidade e a resistência mecânica da fibra são fatores determinantes no comportamento final do compósito. A Tabela 4 indica o módulo de elasticidade de algumas fibras.

Tabela 4 - Módulo de elasticidade das fibras

Fibra	Módulo de Elasticidade (GPa)
Carbono	230
Aço	200
Asbestos	164 - 196
Aramida	65 - 133
Vidro	70 - 80
Polipropileno	5 - 77
Nylon	4

Fonte: Bentur e Mindess (1990)

Quinino (2015), atenta para o fato que, com a utilização de fibras com valores baixos de módulo de elasticidade, sua baixa resistência mecânica faz com que o aumento do teor das fibras à matriz seja necessário, possibilitando o reforço adequado da mesma. Entretanto, fibras de alto módulo de elasticidade tendem a possuir um elevado nível de tensão no momento da ruptura da matriz, fazendo com que a fibra atue como reforço. Porém, apenas um elevado módulo de elasticidade não é suficiente para que a fibra atue como reforço da matriz, tendo em vista que uma baixa resistência à tração e ao cisalhamento anula o efeito de reforço pós-fissuração.

Estudos realizados por Figueiredo (2000), que analisou o comportamento de uma matriz hipotética reforçada com fibras de alto e baixo módulo de elasticidade, indicaram que, para um dado carregamento, a utilização de fibras com baixo módulo não oferecem boa capacidade de reforço pós-fissuração da matriz, como também podem proporcionar uma grande deformação do compósito, caso tenha resistência mecânica e ductilidade suficientes para igualar o nível de tensão necessário. Em contrapartida, a fibra de alto módulo de elasticidade já possuía um elevado nível de tensão no momento de ruptura da matriz, permitindo assim, que a mesma atue como reforço, caso sua resistência não tenha sido superada.

Ainda no tocante às fibras com baixo módulo de elasticidade, Acetti e Pinheiro (2000), salientam que, em geral, esse tipo de fibra apresenta um elevado coeficiente de Poisson, o que induz a uma maior perda de aderência na interface fibra-matriz, fazendo com que os fenômenos de deslizamento e arrancamento de fibras curtas e alinhadas ocorra com maior facilidade.

Logo, é válido ressaltar que fibras de baixo módulo de elasticidade e resistência têm como função minimizar o risco de fissuração plástica, diferentemente daquelas de alto módulo de elasticidade e resistência, que proporcionam reforço ao concreto endurecido.

2.5.4 Distribuição e orientação das fibras

Além das propriedades citadas, a distribuição e orientação das fibras representam fator influente na eficiência do compósito. No caso do concreto, é comum que se busque uma distribuição aleatória, homogênea e isotrópica das fibras na matriz. Todavia, não há como certificar-se quanto à isotropia e homogeneidade, tendo em vista a influência de fatores como moldagem e compactação.

Gettu et al. (2005) destacam a importância que o processo de confecção, distribuição e orientação das fibras possuem, afirmando que esses fatores estão diretamente relacionados a contribuição das fibras à rigidez, tanto com relação às fissuras, quanto à uniformidade de sua distribuição.

Algumas pesquisas acerca da influência da compactação na orientação das fibras constatam que, durante o processo de moldagem, as vibrações tendem a provocar a segregação das fibras, promovendo orientações preferenciais destas ao longo de planos horizontais (GETTU, GARDNER, SALDIVAR & BARAGÁN, 2005; TOUTANJI e BAYASI, 1998).

Estudos realizados por Gettu et al. (2005) apontam que há existência de uma orientação preferencial das fibras derivadas da vibração ao longo de planos perpendiculares à direção de lançamento, certificando ainda que na parte inferior dos corpos-de-prova as fibras encontram-se em maior quantidade.

Diante dos parâmetros expostos, é evidente a importância que a escolha do tipo de fibra, de acordo com suas características geométricas, bem como os fatores relacionados ao seu teor e modo de inserção ao compósito, implicam para resultar em melhores resultados ao mesmo.

2.6 Aderência

A aderência pode ser entendida como o fenômeno de ligação que ocorre entre a barra de aço e o concreto, que, atuando de forma conjunta, evita deslocamentos entre os mesmos.

Sabe-se que a resistência destes dois materiais são distintas, onde, o aço resiste a tração e o concreto a compressão, e é a aderência a responsável por fazer com que os mesmos trabalhem juntos.

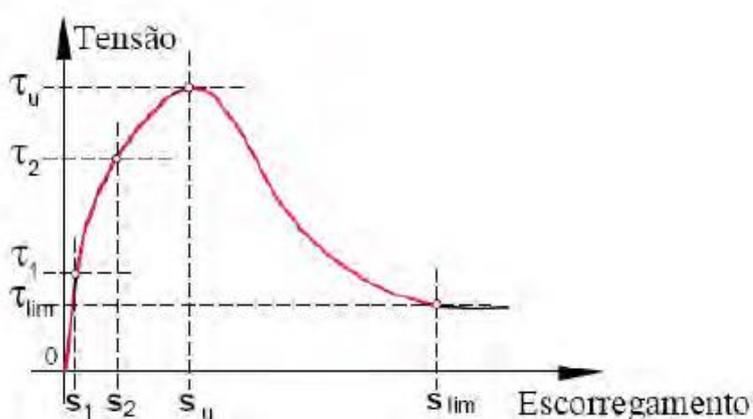
Como cita Dumêt (2003), nas peças de concreto armado, há uma variação de tensão ao longo do comprimento da armadura, principalmente nas zonas de ancoragem e de alternância de momento fletor. Para que não ocorra o escorregamento da armadura e a peça mantenha-se em equilíbrio, surge a necessidade da atuação das tensões de aderência.

Segundo Santana (2014), a tensão de aderência pode ser indicada como a relação entre a força que atua na barra e a superfície da barra aderente ao concreto, e, embora esta relação seja simples, existem diversos fatores que podem influenciar o comportamento da mesma. Leonhardt e Monning (1977) citam algumas das causas pelo surgimento das tensões de aderência, que embora surjam devido a uma variação de tensão ao longo da barra de aço, é considerada como sendo uniformemente distribuída ao longo da mesma. São estas: ações, fissuras, forças de ancoragem nos extremos das barras, variações de temperatura, retração e deformação lenta do concreto.

2.6.1 Tipos de aderência

A aderência entre o concreto e o aço é dividida em diversas parcelas, como cita Fusco (2013), porém, a mesma pode ser fragmentada, de maneira didática, em três frações. São estas: a aderência química (adesão), a aderência por atrito, e a aderência mecânica. Essa divisão é baseada em curvas de tensão de cisalhamento versus deslizamento, como ilustra a Figura 10.

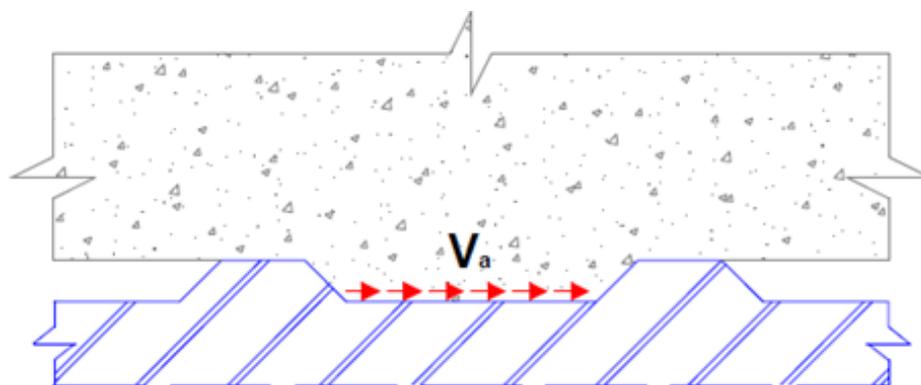
Figura 10 - Curva tensão de cisalhamento versus escorregamento



Fonte: Silva (2006)

O trecho inicial da curva, representado pelo deslizamento entre 0 e s_1 corresponde a aderência por adesão, ou aderência química, que consiste na resistência ao esforço cisalhante entre o aço e as partículas de concreto. Este tipo de aderência é oriunda das ligações físico-químicas que são desenvolvidas na região de contato entre os dois materiais no período de pega do cimento. A aderência por adesão tem uma resistência de cerca de 0,1 MPa e inicia-se quando começa o deslizamento, não podendo ser recuperada (FIP-MODEL CODE, 2010). A Figura 11 ilustra como ocorre este tipo de aderência, que pode ser constatada através da separação de um bloco concretado sobre uma chapa metálica, como cita Reyes (2009).

Figura 11 - Aderência por adesão

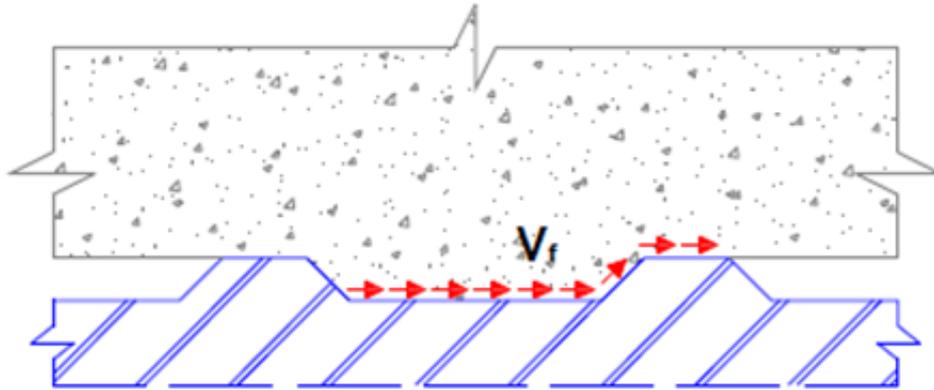


Fonte: Reyes (2009)

Já a aderência por atrito, é representada pelo trecho plano da curva, que é típico de barras lisas, e surge no momento em que um material tende a deslocar sobre o outro. (FUSCO, 1995) explica que este tipo de aderência depende do coeficiente de atrito presente na interface aço-concreto, da rugosidade superficial da barra de aço, como também das pressões transversais que ocorrem devido à retração ou confinamento do concreto, e atuam diretamente na barra de aço.

Através do ensaio de arrancamento, que consiste na aplicação de uma força de tração V_f , na barra, conforme ilustra a Figura 12, pode-se determinar esta parcela de aderência.

Figura 12 - Aderência por atrito

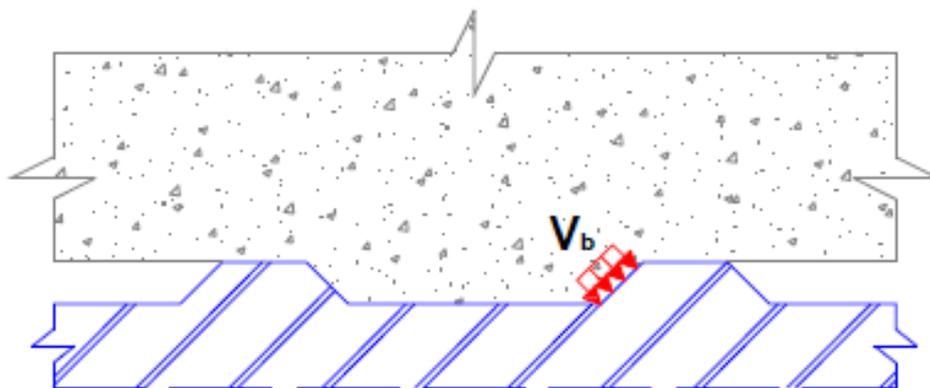


Fonte: Reyes (2009)

Por fim, o último trecho ascendente inclinado da curva representa a aderência mecânica, que sucede devido a forças concentradas de compressão que manifestam-se perpendiculares às faces das nervuras no instante em que ocorre a tração na barra e a mesma tende a deslizar, representada pela força V_b , ilustrada abaixo, na Figura 13. Estas forças acarretam no surgimento de micro-esmagamento e micro-fissuração no concreto na região das nervuras. Já nas barras lisas, esta parcela de aderência surge devido às irregularidades superficiais relativas ao processo de fabricação e ao processo de corrosão que as mesmas estão sujeitas. A resistência de aderência desse tipo de mecanismo pode variar de 0-0,8 MPa, de acordo com a área da nervura de aço que se encontra em contato com o concreto (FIP-Model Code, 2010).

A parcela referente à aderência mecânica é a principal responsável pela ancoragem da barra de aço no concreto, promovendo certa resistência pós-pico (ALMEIDA FILHO, 2006).

Figura 13 - Aderência mecânica



Fonte: Reyes (2009)

2.6.2 Parâmetros que influenciam na aderência

Dentre os diversos fatores que influenciam a aderência, o ACI 408R-03 (2003) indica os principais, que podem ser classificados em três grupos: o grupo relacionado às propriedades das barras (ex: geometria e diâmetro); o referente às propriedades do concreto (ex: resistência à compressão e adensamento); e o que envolve as características estruturais (ex: cobertura do concreto e espaçamento entre barras). A seguir, serão destacados alguns destes parâmetros.

2.6.2.1 Propriedades das barras

- Diâmetro da barra

Diversos autores constataram que um aumento no diâmetro da barra acarreta em uma diminuição na tensão máxima de aderência. Como explica Simplício (2008), a justificativa para tal fenômeno pode ser esclarecida tendo em vista que com o aumento do diâmetro das barras e conseqüente maior altura das nervuras, uma maior retenção de água de amassamento estará presente na interface barra-concreto, implicando numa zona de transição porosa, logo, mais propensa ao esmagamento ou cisalhamento do concreto que está em contato com as nervuras da barra.

Entretanto, Barbosa (2001) contraria as afirmações citadas acima. Em sua tese de doutorado, observou que à medida que ocorria um aumento no diâmetro das barras, a tensão máxima de aderência também aumentava, onde, um dos fundamentos defendidos pela mesma

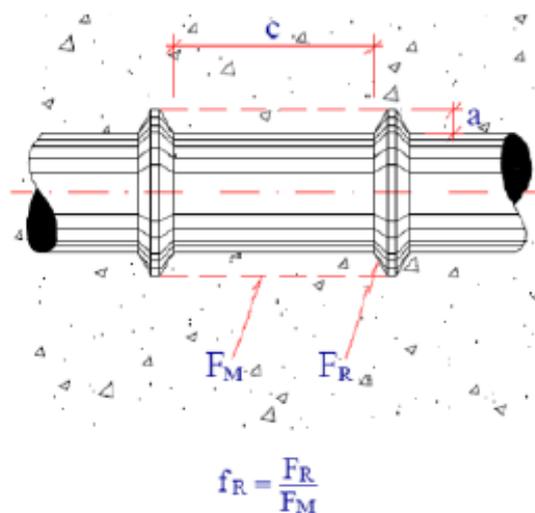
foi na dependência existente entre o cobrimento e trecho aderente com o diâmetro da barra. A autora ainda ressalta que, para ela, a questão do enfraquecimento da ligação existente entre barra e concreto, proporcionado pela maior dimensão da zona de transição, devido ao maior diâmetro da barra e suas respectivas nervuras, está mais relacionado ao adensamento do concreto do que da espessura da zona de transição aço-concreto.

- Geometria das nervuras

Segundo o ACI 408R-03 (2003), o estudo pioneiro sobre a resistência de aderência com barras de aço nervuradas e lisas foi realizado por Abrams (1913), empregando amostras de viga e *pull-out*. De acordo com os resultados obtidos, o autor pôde constatar que as barras nervuradas proporcionavam uma maior resistência de aderência que as barras lisas.

De acordo com Leonhardt e Monnig (1977), existem quatro fatores que influenciam na resistência à aderência em barras nervuradas, são estes: forma, inclinação, altura e distância entre as nervuras. Além destes, outro parâmetro que é citado pelo autor, consiste na superfície relativa f_R , que corresponde a relação entre as superfícies das nervuras F_R e a superfície lateral F_M , que representam, respectivamente, a área de contato dos consoles de concreto sobre as nervuras e a superfície do cilindro de concreto a ser cortado, parâmetros estes que podem ser ilustrados na Figura 14.

Figura 14 - Superfície relativa da nervura



Fonte: Leonhardt e Monnig (1977)

- Condição superficial das barras

A condição superficial na qual uma barra de aço encontra-se é de fundamental importância no comportamento que a mesma irá apresentar em relação à resistência de aderência, tendo em vista o efeito que esta condição proporciona entre o atrito da barra e o concreto. Como já citado anteriormente, sabe-se que a parcela de aderência por adesão e atrito possui mais influência para barras lisas do que nervuradas, e que, essas parcelas sofrem interferências na presença de substâncias que fixam-se à barra, como impurezas.

Dumêt (2003) e Fang et al. (2004) afirmam que, uma superfície mais rugosa, como as geradas em um processo de corrosão, pode melhorar a aderência mecânica nas armaduras lisas. Entretanto, para oxidações maiores, o diâmetro da armadura pode reduzir consideravelmente, o que implica numa diminuição da capacidade resistente da barra, principalmente para as nervuradas.

2.6.2.2 Propriedades do concreto

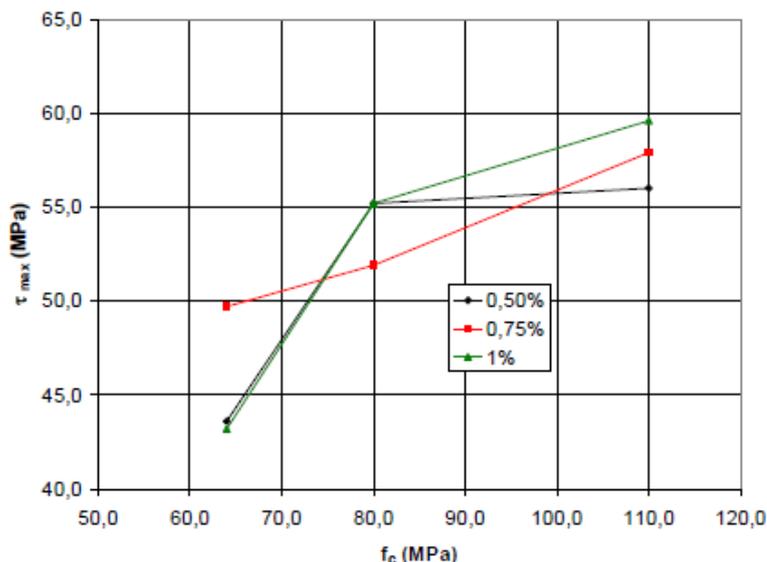
- Resistência à compressão

Segundo Ribeiro (1985) apud Santana (2014), em concretos de baixa resistência, a ruptura de aderência geralmente ocorre devido ao arrancamento da barra, onde é envolvido o corte do concreto circundante e o esmagamento do concreto localizado à frente da nervura. Entretanto, tratando-se de concretos de alta resistência, a ruptura geralmente ocorre por fendilhamento, onde, quem rege a eficácia da aderência é a resistência à tração do concreto. Em casos como este, o lapso ocorre pelo surgimento de fissuras longitudinais, que surgem quando as tensões radiais internas igualam ou superam a resistência à tração do concreto.

Simplício (2008) estudou a aderência em concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço. Através de ensaio de arrancamento, foi analisado o desempenho de três classes de resistência distintas, 64MPa, 80MPa e 110MPa. Como ilustra a Figura 15, pode-se observar que a relação entre a tensão de aderência e a resistência à compressão não é linear, porém, o autor concluiu que, com o aumento da resistência, a tensão máxima de aderência também aumenta, para os casos de concreto com e sem fibra. Simplício também comenta a forma das curvas que, para ele, sofreram influência da resistência, onde, para valores maiores

da mesma, o deslizamento relativo ao início do patamar diminui enquanto a parte ascendente torna-se mais inclinada, concluindo que, ocorre um aumento da rigidez ao deslizamento.

Figura 15 - Variação da tensão de aderência com a resistência à compressão



Fonte: Simplício (2008)

- Presença de fibras

Em relação às fibras, quando incorporada ao concreto, pode-se analisar tanto a influência que a mesma possui sobre o teor adicionado, como o tipo empregado, tendo em vista a grande diversidade de fibras disponíveis no mercado. Como cita Santana (2014), a utilização de fibras no concreto possui a maior função de aprimorar a ductilidade do compósito, e, no tocante à aderência, uma melhora na ductilidade do concreto implica em uma redução no surgimento de fissuras.

Quando se trata do teor de fibras adicionado, Harajili et al. (1995) apud Santana (2014), concluíram em seus estudos que, para baixos teores de fibras, existe uma influência mais significativa na ruptura por fendilhamento, tendo em vista a atuação das mesmas no controle da fissuração. Já para os casos de ruptura por arrancamento, a contribuição das fibras é menor, devido a menor quantidade de fissuras, que conseqüentemente, favorece para uma contribuição menor das fibras. Em contrapartida, os autores afirmam que para teores altos de fibra, tanto na ruptura por arrancamento como por fendilhamento, a presença de fibras é

relevante, situação esta que pode ser justificada pelo aumento da resistência à tração do concreto tendo em vista o alto teor de fibras empregado.

Melo (2016) representou de forma resumida, a influência que alguns tipos de fibra (aço, polipropileno e vidro) possuem no tocante à aderência, através de estudos realizados por diversos autores, como ilustra a Tabela 5. Valendo salientar que este resumo apresentado não deve ser generalizado para um comportamento unificado dos concretos reforçados com fibra, tendo em vista outras variáveis, como o teor da adição, citado anteriormente, que possui influência sobre o comportamento mecânico do concreto.

Tabela 5 - Resumo do comportamento da aderência entre aço e concreto com fibras

Referências	CRFA	CRFP	CRFV	CRFAP
Huang et al. (2016)	+	≈		≈+
Yazici e Arel (2013)	≈+			
Soylev (2011)	+	+	-	
Dancygier et al. (2010)	≈+-			
Ganesan et al. (2014)	≈-	≈-		≈+-
Harajli et al. (1997)	≈+	+		
Yerex II et al. (1985)		≈		

Legenda: + : Aumentou - : Diminui ≈ : Valor aproximado

Fonte: Melo (2016)

- Adensamento

O adensamento possui a função de expulsar o ar que fica aprisionado no concreto, durante as diversas etapas que o mesmo é submetido: fabricação, transporte e lançamento. Caso o adensamento não seja realizado, o concreto torna-se poroso, conseqüentemente mais permeável, comprometendo fatores como a resistência mecânica do mesmo. Em termos da aderência, um adensamento adequado, geralmente obtido através de vibração, desempenha o papel de reduzir os efeitos da segregação e da exsudação, que resulta no acúmulo de água e de concreto fraco e de baixa densidade abaixo das nervuras das barras de aço, tornando esta região mais fraca quando solicitada, sobretudo quando se tratar de concretos com baixo teor de água/cimento (SANTANA, 2014).

Estudos realizados por Chan, Chen e Liu (2003), que analisaram a influência da aderência em diferentes tipos de concreto, mostraram que as tensões de aderência entre barra

de aço e concreto reduzem significativamente quando não é aplicado nenhum tipo de adensamento, particularmente nos casos de concreto de alto desempenho. Além das conclusões citadas, os autores puderam completar o estudo, afirmando que os concretos autoadensáveis desenvolvem tensões últimas de aderência maiores que os concretos convencionais sujeitos ao adensamento.

2.6.2.3 Características estruturais

- Posição das barras

Em estudos de diversos autores foi constatada a influência que parâmetros como a posição da barra em relação à concretagem, exercem sobre a aderência. Isso, tanto para a disposição (horizontal ou vertical) que a mesma se encontrava, quanto para a distância em relação ao fundo ou topo da peça.

De acordo com estudos realizados por Soylev (2011), que analisou a aderência entre barras de aço no concreto localizadas em três posições distintas, denominadas região superior, centro e inferior, a aderência apresenta valores mais significativos para as concretagens realizadas com barras situadas na região inferior. O autor analisou tanto as barras lisas como as nervuradas, e pôde concluir que, para estas, a influência da profundidade foi menos significativa. Em contrapartida, para as barras lisas, foi constatada uma redução da resistência de aderência de cerca de 65%. A Tabela 6 e Tabela 7 indicam os resultados apresentados pelo autor.

Tabela 6 - Resistência de aderência das amostras de arrancamento com barras lisas

Posição da armadura	Resistência de aderência (MPa)			
	Control	SFRC	PFRC	GFRC
Inferior	2,47	2,35	2,53	2,47
Centro	1,16	-	1,22	1,05
Superior	0,82	0,83	0,87	0,87

Legenda:

Control: concreto sem fibras, FRC: concreto com fibras

S: fibras de aço, P: fibras de polipropileno e G: fibras de vidro

Fonte: Soylev (2011)

Tabela 7 - Resistência de aderência das amostras de arrancamento com barras nervuradas

Posição de moldagem	Resistência de aderência (MPa)			
	Control	SFRC	PFRC	GFRC
Inferior	5,20 (0,3)	6,33(3,6)	5,01 (5,4)	4,91(11,5)
Centro	4,70 (16,1)	5,24 (27,0)	4,50 (7,4)	4,70 (10,4)
Superior	4,27 (14,8)	4,62 (23,1)	3,74 (15,8)	4,61 (9,3)

Legenda:

Control: concreto sem fibras, FRC: concreto com fibras

S: fibras de aço, P: fibras de polipropileno e G: fibras de vidro

Fonte: Soylev (2011)

- Armadura de confinamento

O confinamento que a armadura transversal proporciona tem atuação direta no modo de ruptura por aderência. Muitas vezes, uma ruptura que ocorreria por fendilhamento, é substituída por uma ruptura de arrancamento da barra, caracterizada por possuir uma maior ductilidade quando comparada à outra.

Zuo e Darwin (2000) constataram que a resistência de aderência aumenta conforme a área relativa de nervura na presença de nervura transversal também aumente, pois, ocorre um retardo no processo de fissuração, além de que, a armadura de confinamento concede um número maior de nervuras com influência na transferência de tensões entre a barra e o concreto circundante.

- Idade do concreto

A influência deste parâmetro é considerada por diversos autores como tendo a mesma importância que a resistência à tração ou compressão do concreto sobre a aderência. Ao analisarem a atuação que a idade do concreto possuía sobre a variação da tensão de aderência, Khandaker e Hossain (2008) puderam concluir que, para as barras lisas, as tensões mantêm-se inalteradas, para o concreto convencional. Fato este, que pode ser justificado pelo fato de que, nas barras lisas a tensão de aderência é proveniente, principalmente, da aderência por atrito, que independe da idade do concreto. Por outro lado, para as barras nervuradas analisadas, foi constatado um acréscimo da tensão de aderência conforme a idade e resistência do concreto cresciam. Logo, os autores puderam concluir que as parcelas de aderência por atrito e química possuem menos influência na idade do concreto que a parcela mecânica.

2.6.3 Tipos de ensaio

Existem diversos ensaios que permitem obter o desempenho da aderência, que pode ser quantificado por meio da curva tensão de aderência versus deslizamento da barra. A seguir serão descritos os ensaios comumente utilizados.

2.6.3.1 Ensaio de arrancamento

O ensaio de arrancamento (*pull-out test*) consiste em um dos mais tradicionais utilizados para determinação de aderência aço-concreto, consiste em extrair uma barra de aço localizada no centro do corpo de prova de concreto, que é apoiado sobre placas de apoio na máquina de ensaio, onde, as duas extremidades da barra ficam projetadas para fora do corpo de prova. Em um extremo da barra é medida a força de tração aplicada, e no outro o deslocamento.

Este ensaio mede uma tensão de aderência média (Equação 1). Esse fato deve-se à dificuldade em medir a variação da tensão de aderência ao longo do comprimento de ancoragem.

$$\tau_b = \frac{F_t}{u \cdot \ell} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

τ_b a tensão de aderência média;

F_t a intensidade da força que solicita a barra;

u o perímetro da barra;

ℓ comprimento de ancoragem da barra.

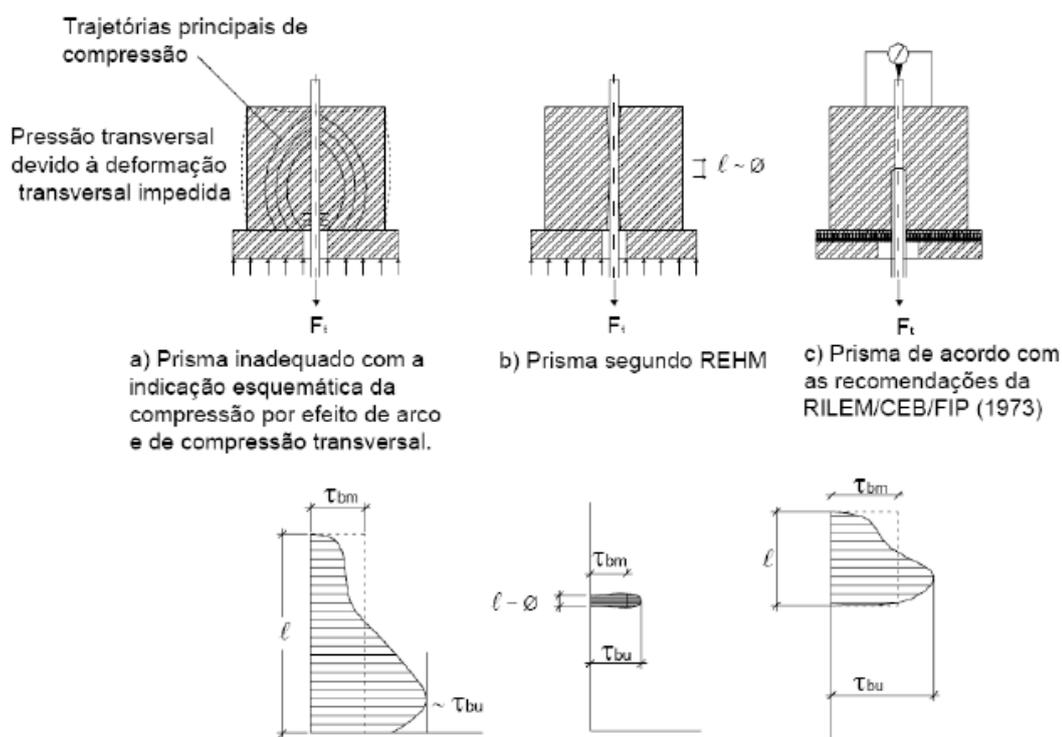
Como qualquer outro ensaio, o de arrancamento possui suas vantagens e desvantagens. Em relação às vantagens, diversos autores, como Barbosa (2001), ressaltam o baixo custo na execução do ensaio, a simplicidade para confecção dos corpos de prova, e a possibilidade de isolamento das variáveis que possuem influência sobre a aderência.

Em contrapartida, Lorrain e Barbosa (2008) explicam que um dos principais problemas apresentados no procedimento do ensaio, consiste no fato das placas utilizadas sujeitarem o concreto à compressão, fato este que, conseqüentemente, irá resultar em

restrições às deformações transversais dos corpos de prova, o que pode gerar uma superestimação dos resultados.

De acordo com Leonhardt e Monning (1977), o tamanho e a forma do corpo de prova, bem como a posição e o comprimento do trecho de aderência da barra, podem influenciar diretamente os resultados obtidos. Então, a fim de minimizar os problemas citados, os autores sugerem que sejam utilizados trechos sem aderência, como mostram as Figuras 16b e 16c.

Figura 16 - Prisma para ensaio de arrancamento e respectivas variações da tensão de aderência ao longo do comprimento



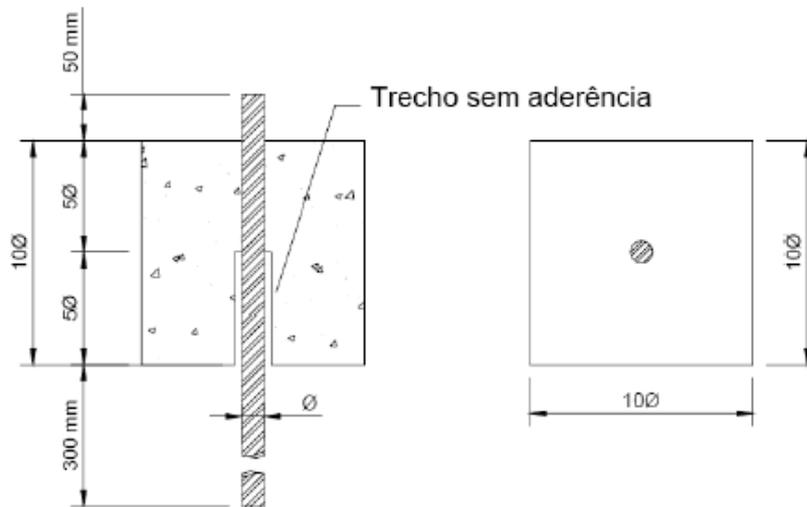
Fonte: Leonhardt; Mönnig (1977)

Como pode ser analisado na Figura 16, o corpo de prova (a) é inadequado, tendo em vista o impedimento da deformação transversal da placa de apoio, onde através da compressão por efeito arco, ocorre uma compressão transversal sobre a barra, ocasionando uma aderência por atrito adicional. Entretanto, essas influências são minimizadas nos exemplos (b) e (c), onde são utilizados trechos sem aderência.

Existem diversas normas com variações deste ensaio, porém, uma das mais utilizadas consiste na especificação feita pela RILEM-FIB-CEB (1973), na qual as duas extremidades da

barra são projetadas para fora do prisma de concreto, onde é tracionada apenas uma das extremidades. A Figura 17 ilustra o modelo proposto.

Figura 17 - Prisma para ensaio de arrancamento



Fonte: RILEM-FIP-CEB (1973)

A tensão de aderência é calculada de acordo com a Equação 2:

$$\tau_b = 0,0637 \frac{F_t}{\phi^2} \frac{30}{f_{cm}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

τ_b a tensão de aderência média (em MPa);

F_t a força de tração (em kN);

ϕ o diâmetro da barra (em mm);

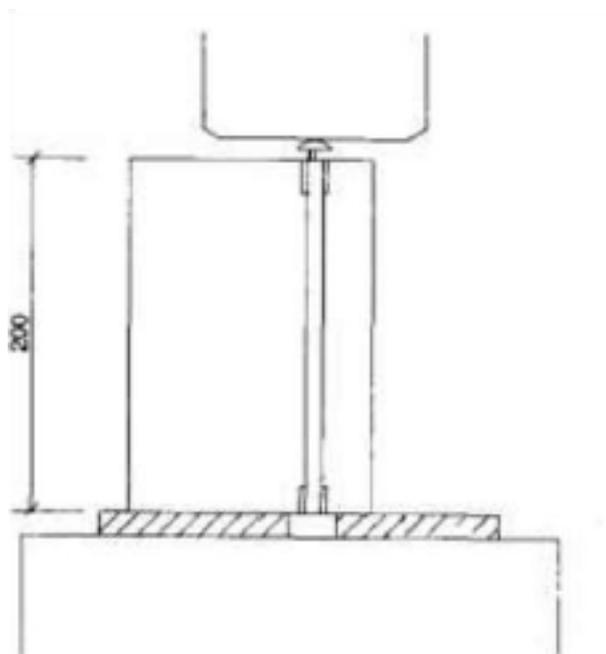
f_{cm} a resistência média à compressão do concreto (em MPa).

2.6.3.2 *Push-out test*

O ensaio denominado *push-out test* é prescrito por RILEM, na publicação AAC 8.2 (1992) - *Push-out test for reinforcement*, a qual descreve o ensaio que tem por objetivo a determinação da tensão de aderência do aço ao concreto celular autoclavado (AAC). Este ensaio consiste numa prisma cortado a partir de uma laje reforçada, onde, a seção transversal do mesmo corresponde à seção transversal da laje. A metodologia do ensaio consiste numa

força de compressão aplicada sobre a barra de aço incorporada no prisma de forma que a outra extremidade da barra não seja tensionada. A Figura 18 ilustra o esquema do ensaio.

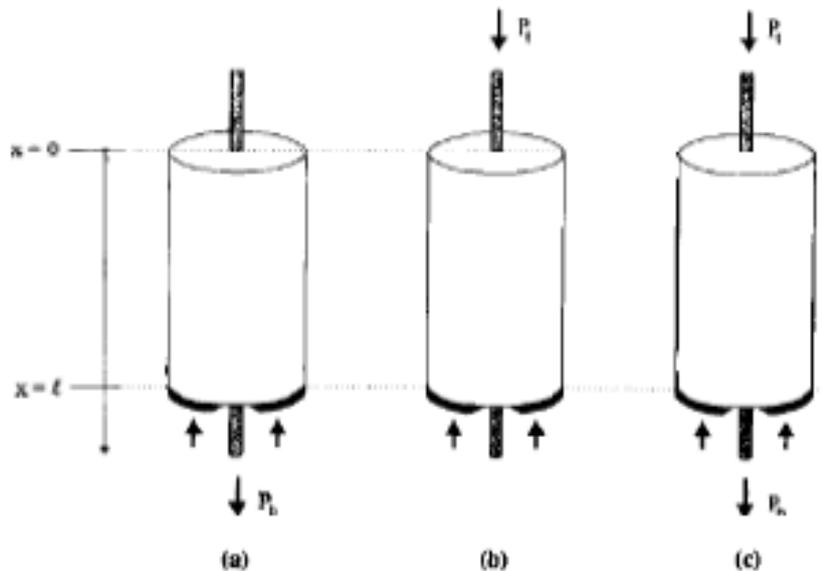
Figura 18 - Posição da amostra para o ensaio push-out em AAC



Fonte: RILEM AAC 8.2 (1992)

Um ensaio similar ao *push-out* foi estudado por Silva (2014), porém foi denominado de *push-in*. Este não possui normalização específica, porém, embora pouco utilizada, foi estudada por alguns autores, como Abrishami et al. (1996), que realizou comparações entre os ensaios *pull-out*, *push-in* e uma combinação dos dois. De acordo com os resultados analisados, os autores puderam concluir que não há muita variação no desempenho da aderência quando comparada entre os métodos *pull-out* e *push-in*, em contrapartida, a combinação dos dois mostrou-se relativamente melhor no tocante a distribuição de tensão da barra de aço. A Figura 19 ilustra as variações dos ensaios realizados.

Figura 19 - Desenho esquemático do método de ensaio (a) Pull-out, (b) Push-in e (c) ensaio composto pelos dois



Fonte: Abrishami et al. (1996)

Melo (2016) realizou um estudo experimental da aderência entre barras de aço e concreto com fibras, onde, a tensão de aderência foi determinada a partir da realização do ensaio *push-out test*. A autora utilizou corpos de prova prismáticos nas dimensões 20x20x20 cm e comprimento de ancoragem de cinco vezes o diâmetro da barra.

2.6.3.3 Ensaio de viga e de extremidade de viga

Segundo Almeida Filho (2006), o ensaio de viga (*beam test*) foi estabelecido a partir da necessidade de avaliação da aderência aço-concreto em ensaios de flexão. Castro (2002) explica que, devido à compressão longitudinal do concreto, que pode ser analisada no ensaio de arrancamento, a utilização de um corpo de prova do tipo viga para determinação da capacidade de ancoragem das barras é usualmente discutido por estudiosos da área.

O “Beam Test” consiste em um corpo de prova composto de dois blocos retangulares de concreto armado com uma barra de aço na parte inferior (cuja aderência é estudada) e uma rótula de aço na parte superior. De acordo com o diâmetro da barra, são feitas diferenciações nas dimensões do corpo de prova, conforme Figura 20 e Figura 21.

A viga é submetida a flexão simples, sobre dois apoios, onde duas forças iguais e simétricas em relação ao perfil de aço são aplicadas. São colocados deflectômetros nos

extremos das barras, a fim de que possam ser medidos os deslocamentos dos mesmos após cada incremento de força. A tensão média de aderência é calculada conforme Equação 3.

$$\tau_b = \frac{R_{st}}{\pi \cdot \phi \cdot \ell} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$R_{st} = \frac{F \cdot a}{4 \cdot z} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

τ_b a tensão de aderência (em MPa);

R_{st} a força de tração na armadura (em N);

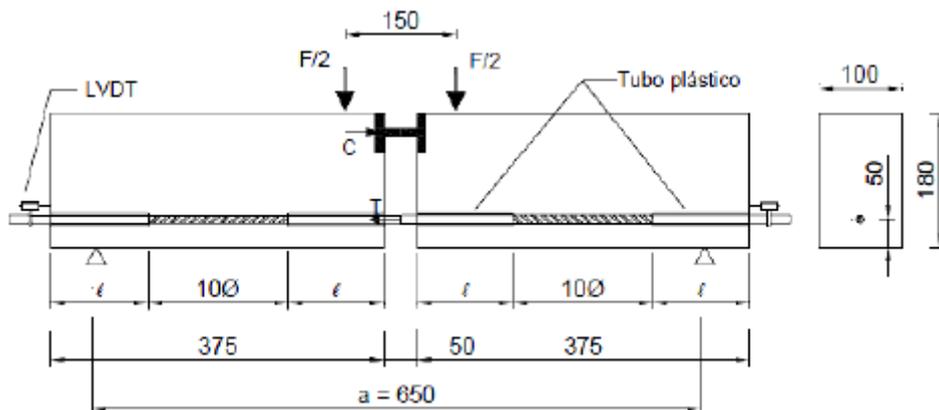
a o comprimento da viga;

z a distância entre a resultante de tração e a resultante de compressão;

ϕ o diâmetro da barra (em mm);

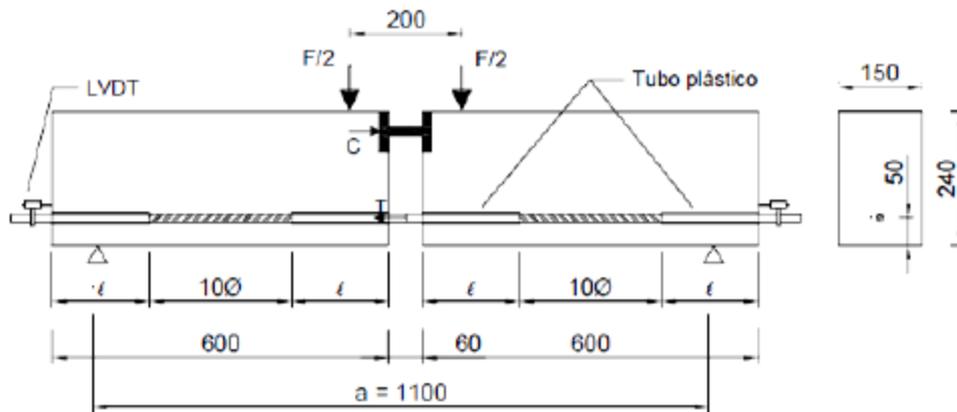
ℓ o comprimento de aderência, igual a 10ϕ (em mm).

Figura 20 - Ensaio de viga para $\phi < 16$ mm



Fonte: RILEM-FIB-CEB (1973)

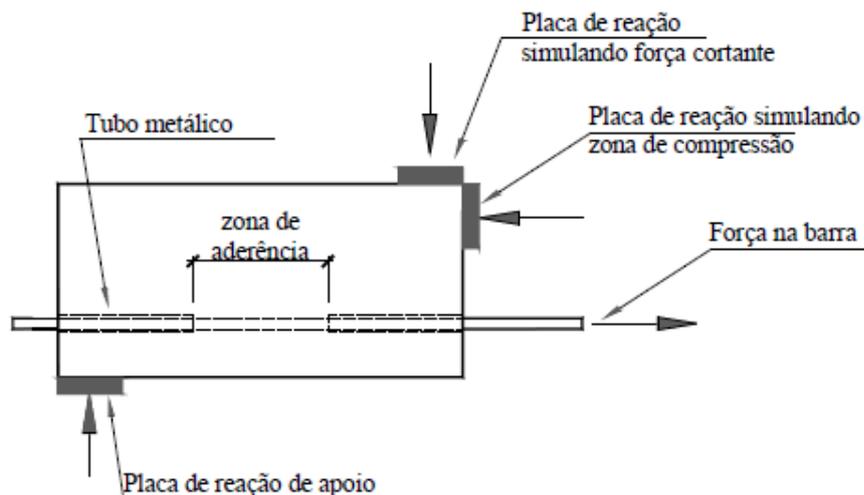
Figura 21 - Ensaio de viga para $\varnothing \geq 16$ mm



Fonte: RILEM-FIB-CEB (1973)

Como variante desse ensaio, há o ensaio de extremidade de viga, como explica Ribeiro (1985), com a vantagem de oferecer as mesmas informações, porém com redução do tamanho do corpo de prova. Consiste em uma barra tracionada que situa-se na parte inferior do corpo de prova, onde, na parte superior, a reação simula a zona de compressão na viga, equilibrando assim, o momento oriundo do par de forças que simulam a reação de apoio e a força cortante transmitida pelo concreto. A Figura 22 ilustra a disposição deste ensaio.

Figura 22 - Ensaio de extremidade de viga

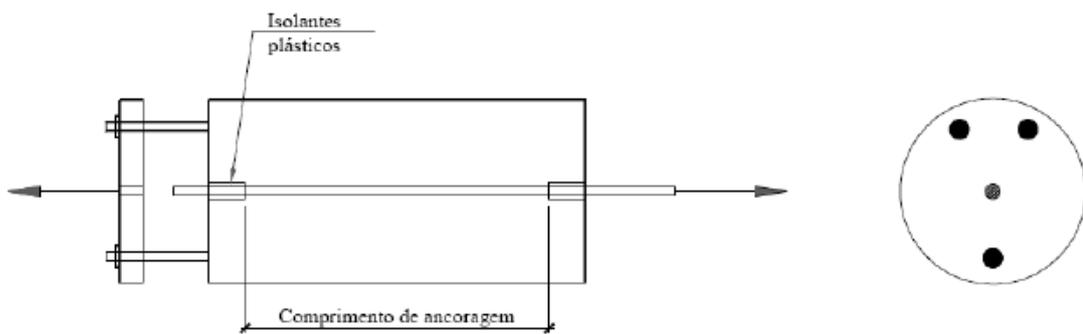


Fonte: Simplício (2008)

2.6.3.4 Ensaio das quatro barras

Realizado por Fusco (1995), este ensaio teve o intuito de estudar a ancoragem em condições de emenda. O ensaio das quatro barras é baseado no ensaio de arrancamento, onde uma das barras fica situada na região central do cilindro de concreto, caracterizada por ser a responsável por suportar a tração exercida, enquanto as demais são dispostas nos vértices de um triângulo, como ilustra a Figura 23.

Figura 23 - Esquema geral do ensaio desenvolvido por Fusco

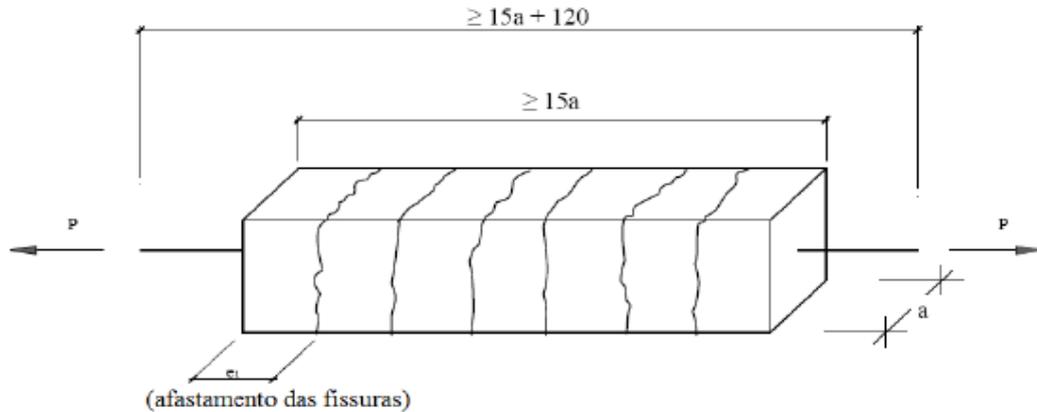


Fonte: Fusco (1995)

2.6.3.5 Ensaio de tração direta

De acordo com Barbosa (2001), geralmente esse ensaio é utilizado, para se estudar a fissuração, simular a zona de transição entre duas fissuras de flexão e determinar o coeficiente de conformação superficial da barra. O ensaio de tração direta consiste em exercer um esforço de tração nas extremidades de uma barra moldada no centro de um corpo de prova cilindro ou prismático de concreto armado. A Figura 24 ilustra o esquema do ensaio.

Figura 24 - Ensaio de tirante – dimensões em mm



Fonte: Barbosa (2001)

A partir da determinação do afastamento e abertura das fissuras resultantes, é possível determinar o chamado coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados à armadura de concreto armado, calculado de acordo com a Equação 5, normatizada pela NBR 7477 da ABNT (1982).

$$\eta = \frac{2,25d}{\Delta L_{\text{médio}}} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\Delta L_{\text{médio}} = \frac{e}{n} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

η é o coeficiente de conformação superficial;

d o diâmetro da barra;

$\Delta L_{\text{médio}}$ a distância média entre as nervuras considerando as quatro faces;

n o número de fissuras.

2.6.4 Aderência segundo a ABNT NBR 6118/2014

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014, os trechos das barras que se encontrarem em alguma das posições citadas abaixo, serão considerados como localizadas em região de boa situação quanto à aderência:

- ✓ Com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- ✓ Horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, a menos que:

- para peças estruturais com $h < 60$ cm, situadas no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
- para peças estruturais com $h > 60$ cm, localizadas no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

A resistência de aderência de cálculo entre armadura e concreto, segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) é dada pela expressão:

$$fbd = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot fctd \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

$$fctd = \frac{fctk,inf}{\gamma_c} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$fctk,inf = 0,7 \cdot fctm \quad (\text{Eq. 9})$$

$$fctm = 0,3 \cdot (fck)^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Eq. 10})$$

fbd = resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;

$\eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3$ = 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.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Concreto

O traço de dosagem do concreto foi especificado para uma resistência à compressão de 60 MPa aos 28 dias, onde, a dosagem foi realizada tendo como base o exposto em Simplicio (2008).

Para confecção do concreto, foi utilizado apenas um traço para dosagem sem e com fibras, com os percentuais de 0% e 0,5%, respectivamente. A Tabela 8 indica as composições dos materiais utilizados para obtenção do concreto em estudo, em que, podem ser vistas as quantidades, em kg, de cada material utilizado para obtenção de um metro cúbico de concreto com resistência à compressão estimada em 60MPa.

Tabela 8 - Composição do concreto

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento	666,25
Sílica	52,8
Areia	819,5
Brita	1058,5
Superplastificante	13,38
Água	194,25
a/(c+s.a)*	0,27

Fonte: Própria

*a/(c+s.a): fator água/(cimento + sílica ativa)

O cimento utilizado para a moldagem dos corpos de prova foi o CP II Z-32, cujo fabricante é a empresa Elizabeth. A sílica utilizada é comercializada pela Companhia de Ferro-ligas da Bahia (FERBASA), localizada no município de Pojuca, no Estado da Bahia, a qual possui como principal função, a obtenção de um concreto mais denso e resistente, devido a mesma ser caracterizada como um material extremamente fino e com grande superfície específica, fazendo com que os vazios do concreto sejam preenchidos.

O agregado graúdo utilizado foi a pedra britada de origem granítica, oriundo da pedreira BRITEX, localizada no município de Pocinhos-PB, comercialmente denominada de Brita 1. O agregado miúdo empregado corresponde a areia quartzosa proveniente do leito do Rio Paraíba.

A água utilizada é proveniente do abastecimento da cidade de Campina Grande – PB, a qual é administrada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA). O aditivo empregado corresponde ao superplastificante denominado Aditivo MC-PowerFlow 3100, o qual foi introduzido à mistura tendo em vista seu mecanismo de funcionamento que torna possível a produção de concretos com conteúdos de água relativamente baixos, porém, com boa trabalhabilidade.

3.1.2 Aço

O aço utilizado para confecção dos corpos de prova dos ensaios de *push-out* foi o CA50 (aço para concreto armado) com superfície nervurada. Foram utilizadas barras com diâmetros nominais de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm. As características geométricas das barras são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características geométricas das barras

Ø (mm)	Altura da nervura	Distância entre nervuras
10	0,80	6,1
12,5	1,05	8,1'
16	1,50	9,8

Fonte: Própria

3.1.3 Fibras de aço

As fibras de aço utilizadas foram Dramix RC* 65/60-BN, produzidas pela Dramix. Foram escolhidas para o estudo, tendo em vista suas características, conforme descrito em seu caderno de especificações:

- As fibras são coladas em pentes, permitindo assim uma mistura rápida e uma distribuição perfeitamente homogênea, sem a formação de “bolas” e “ouriços”.
- As fibras de aço são fabricadas a partir de fios de aço treilados de primeira qualidade, o que garante resistência à tração sempre maior que 1.000 MPa;
- Os extremos dobrados são considerados a melhor forma de ancoragem das fibras dentro da matriz de concreto.

A Figura 25 ilustra as características da fibra utilizada.

Figura 25 - Características das fibras



Fonte: Belgo Bekaert (2017)

*RC: fibra colada

As fibras que foram adicionadas à mistura de concreto estão ilustradas na Figura 26. Conforme pode ser analisado, as mesmas encontram-se coladas formando pentes, as quais tiveram que ser adicionadas já com presença de água na mistura, fazendo com que a mesma obtivesse uma boa homogeneidade.

Figura 26 - Fibras de aço



Fonte: Própria

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização dos agregados

A caracterização física dos agregados foi realizada a partir dos ensaios de análise granulométrica e massa específica do agregado graúdo e miúdo. A Tabela 10 indica as normas relativas à realização de cada ensaio.

Tabela 10 - Normas utilizadas para a realização dos ensaios de caracterização dos agregados

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7217/1987
Massa específica do agregado graúdo	ABNT NBR NM 53/2003
Massa específica do agregado miúdo	ABNT NBR 9776:1987

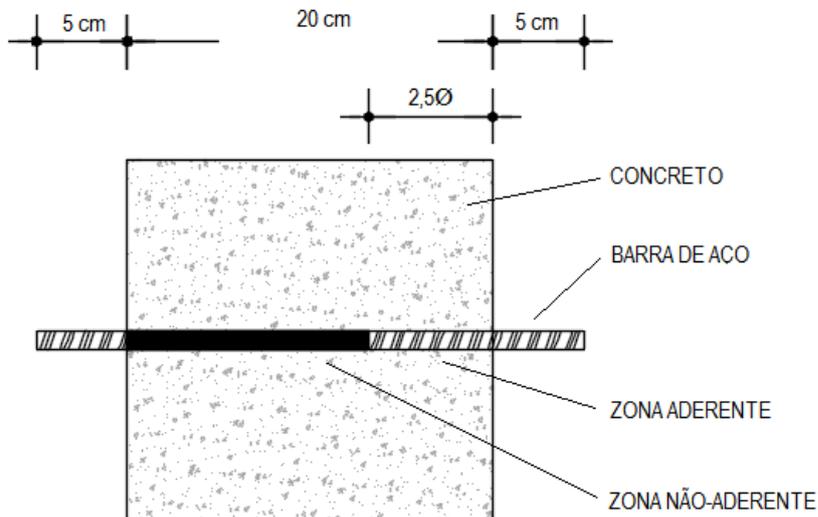
Fonte Própria

3.2.2 Confeção dos corpos de prova

Para realização dos ensaios foram moldados 26 corpos de prova no total, onde, pra cada concretagem foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos para o ensaio de resistência à compressão, nas dimensões 10x20 cm, segundo ABNT NBR 5739/2007; e nove para o ensaio de *push-out*, três por diâmetro de barra (10, 12,5 e 16 mm). Os corpos de prova para o ensaio de *push-out* foram prismáticos nas dimensões 20x20x20 cm e comprimento de ancoragem de duas vezes e meia o diâmetro da barra.

O comprimento de ancoragem adotado baseou-se em estudos realizados por Simplício (2008), o qual observou que para o concreto de alto desempenho, as barras escoavam e rompiam antes da ruptura do concreto ou do arrancamento da barra, caso fossem utilizadas as recomendações propostas por RILEM RC6 (1983), onde, para este, o comprimento de ancoragem adotado é recomendado igual a cinco vezes o diâmetro da barra. A Figura 27 ilustra as dimensões do corpo de prova utilizado no ensaio *push-out*.

Figura 27 - Dimensão dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out



Fonte: Própria

As fôrmas utilizadas para a execução dos corpos de prova foram confeccionadas com madeira plastificada com 15 mm de espessura. A etapa subsequente correspondeu à adequação da zona sem aderência na barra de aço, a qual foi obtida através da implantação de mangueira plástica com diâmetro superior ao da barra ao qual esta envolvia. Para evitar que o concreto fresco penetrasse na mangueira e atingisse a barra, o trecho livre da mesma foi

envolvido com fita isolante. O mesmo cuidado foi realizado nos orifícios presentes nas paredes das fôrmas, evitando a perda de água e a saída de material.

Em relação ao posicionamento das barras nas fôrmas, foram tomadas precauções para que a barra ficasse localizada exatamente no centro, sem qualquer excentricidade em relação ao corpo de prova. As fôrmas e detalhes da adequação da zona de aderência e posicionamento da barra são ilustrados na Figura 28 e Figura 29, respectivamente.

Figura 28 - Fôrmas utilizadas para confecção dos corpos de prova



Fonte: Própria

Figura 29 - Detalhes da adequação da zona de aderência e posicionamento da barra



Fonte: Própria

A mistura dos constituintes do concreto foi realizada em betoneira de eixo inclinado, onde, inicialmente foram misturados os materiais secos (brita, areia, cimento e sílica), a fim de se obter uma mistura mais homogênea. Em seguida foi adicionada a água, com o superplastificante já dissolvido na mesma. Por fim, foram introduzidas as fibras fracionadamente, a fim de facilitar sua dispersão na mistura fresca.

O lançamento para os corpos de prova cilíndricos foi realizado adensamento manual, dividido em três camadas com vinte e cinco golpes cada. Já para os corpos de prova do ensaio de *push-out*, o adensamento foi feito com vibrador de imersão. Após 24 horas da concretagem, os corpos de prova foram desmoldados e submetidos ao processo de cura por imersão em água durante 21 dias. Após este período, foram realizados os ensaios. A Figura 30 e Figura 31 ilustram os corpos de prova moldados e submetidos ao processo de cura, respectivamente.

Figura 30 - Corpos de prova moldados



Fonte: Própria

Figura 31 - Corpos de prova submetidos ao processo de cura



Fonte: Própria

3.2.3 Ensaio de determinação da consistência

O concreto pôde ser caracterizado em relação à sua consistência, de acordo com o ensaio Slump Test, através da medida de seu abatimento, conforme a ABNT NBR NM 67/1998. A Figura 32 ilustra a consistência do concreto no ensaio.

Figura 32 - Slump Test



Fonte: Própria

3.2.4 Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão do concreto foi determinada segundo as recomendações da norma ABNT NBR 5739/2007. Utilizaram-se corpos de prova com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, com idade média de 7 e 21 dias, tanto para os corpos de prova sem fibra, como para os com 0,5% de fibra.

As amostras foram rompidas por compressão axial em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca ELE, com célula de carga de 70 toneladas, como ilustra a Figura 33.

Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Própria

3.2.5 Ensaio de *push-out*

O ensaio de *push-out* foi realizado aos 21 dias após a moldagem. A Figura 34 ilustra a prensa hidráulica utilizada, a qual mede a resistência à compressão axial, da marca LOSENHAUSEN, com célula de carga de 40 tf, localizada no LEMC - UFCG. A partir da carga aplicada, foi possível obter a tensão de aderência.

Figura 34 - Ensaio *push-out*



Fonte: Própria

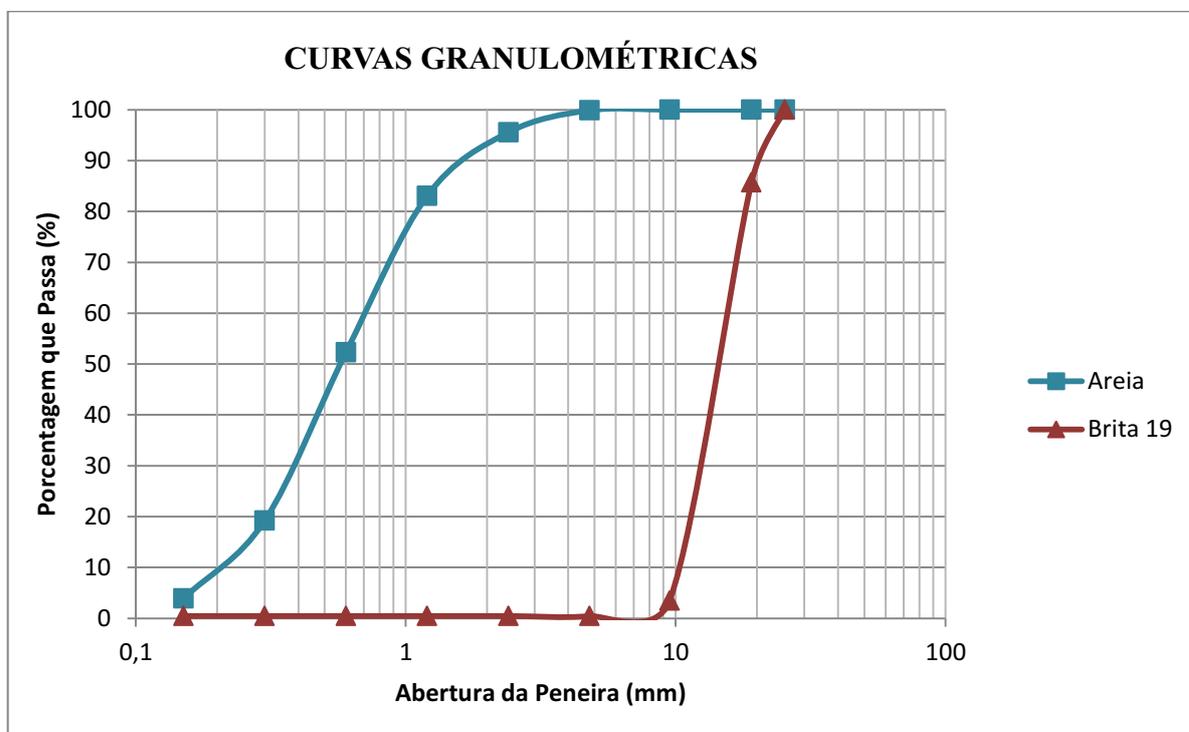
CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização física dos agregados

A Figura 35 ilustra as curvas granulométricas do agregado graúdo e miúdo utilizados na pesquisa.

Figura 35 - Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Própria

A partir das curvas resultantes podem-se determinar as seguintes características dos agregados, como indica a Tabela 11.

Tabela 11 - Características dos agregados

	Areia	Brita
Módulo de finura	2,40	7,08
Diâmetro máximo (mm)	2,40	19,1
Coefficiente de curvatura	1,0	0,96

Fonte: Própria

Logo, a partir dos parâmetros analisados, a areia pode ser classificada como bem graduada e a brita mal graduada. De acordo com a norma da ABNT NBR 7211/2009 o agregado graúdo é classificado segundo a sua granulometria, como brita 1 com dimensão máxima característica (DMC) de 19,1 mm. O módulo de finura da areia a classifica como areia média, tendo em vista o valor correspondente a 2,4 encontrar-se dentro do intervalo de $2,4 < MF < 3,2$.

Além disso, foi determinada a massa específica dos agregados, onde, para a areia, foi obtido um valor equivalente a $2,59 \text{ g/cm}^3$ e para a brita $2,61 \text{ g/cm}^3$.

4.2 Caracterização do concreto no estado endurecido

4.2.1 Resistência à compressão

A partir do ensaio de resistência média à compressão foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 12. Os corpos de prova foram ensaiados com idade média de 7 e 21 dias, dois para cada idade, totalizando quatro sem fibra (CR) e quatro para 0,5% de fibra (CF). O traço adotado para o concreto foi testado antes da concretagem definitiva e apresentou f_c de 52 MPa aos 21 dias.

Tabela 12 - Resistência à compressão do concreto

Concreto	Corpo de prova	Carga (tf)	Carga (tf)	f_c	f_{cm}	$f_{cm, CF /}$
		7 dias	21 dias	(MPa)	(MPa)	$f_{cm, CR}$
CR	CP 1	38,00	-	47,45	47,45	1,00
	CP 2	38,00	-	47,45		
	CP 3	-	43,00	53,69	53,69	1,00
	CP 4	-	43,00	53,69		
CF	CP 5	42,50	-	52,69	52,57	1,11
	CP 6	42,00	-	52,44		
	CP 7	-	46,80	58,44	58,69	1,09
	CP 8	-	47,20	58,93		

Fonte: Própria

A partir dos resultados indicados na Tabela 11, pode ser observado que a adição de fibras ao concreto resultou em um aumento significativo na resistência média à compressão do mesmo, equivalente a 9,3%. Este desempenho era esperado tendo em vista outras pesquisas que utilizaram percentuais de fibra próximos ao utilizado e apresentaram acréscimos na resistência à compressão, como Ding et al. (2014), que para um $V_f = 0,40\%$, observaram aumento de 4%. Já Soylev (2011), utilizando um $V_f = 0,5\%$, obteve aumento de 10% em f_c . Logo, para um volume de fibras menor ou igual a 0,5% é possível obter ganho de resistência à compressão nos concretos com fibras de aço.

Além disso, foi possível observar que os corpos de prova com adição de fibra apresentaram uma ruptura menos brusca que os puros, com uma menor intensidade de destacamento das placas de concreto, fato este que indica um possível aumento da ductilidade do concreto após adição das fibras, detalhe que pode observado nas Figuras 36 (a) e (b), que ilustram os CP's com e sem adição de fibra, respectivamente.

Figura 36 - Ruptura dos corpos de prova (a) com fibra e (b) sem fibra



Fonte: Própria

4.2.2 Tensão de aderência

A Tabela 13 apresenta os valores de tensão máxima de aderência (τ_{\max}) encontrados no *push-out test*, bem como a relação entre a tensão máxima dos concretos com fibras ($\tau_{\max,CF}$) e a dos concretos sem fibras ($\tau_{\max,CR}$).

Tabela 13 - Tensão máxima de aderência do concreto

Concreto	\varnothing (mm)	τ_{\max} (MPa)	$\tau_{\max,CF}/\tau_{\max,CR}$
	10	23,22	1,00
CR	12,5	25,25	1,00
	16	25,95	1,00
	10	25,88	1,11
CF	12,5	29,14	1,15
	16	32,68	1,26

Fonte: Própria

De modo geral, a partir dos resultados indicados na Tabela 12, pode-se notar que para todos os diâmetros houve um acréscimo na tensão máxima de aderência dos concretos com fibras em relação ao concreto sem fibras, no qual o diâmetro correspondente a 10 mm apresentou o menor aumento, representando cerca de 11%. Já para o diâmetro equivalente a 16 mm, essa porcentagem foi maior, resultando um equivalente a 26% de acréscimo. De acordo com a relação $\tau_{\max,CF}/\tau_{\max,CR}$, é possível observar que a partir da incorporação das fibras ao concreto, o aumento em relação ao diâmetro foi gradativo, e que, para ambos os concretos, a tensão máxima de aderência tem acréscimo conforme o diâmetro da barra aumenta.

A fim de realizar uma melhor análise da influência que as variáveis desta pesquisa possuem sobre a tensão de aderência, como o efeito do diâmetro da barra, da incorporação de fibras ao concreto e a forma de ruptura, serão comentados em tópicos, a influência das mesmas, separadamente.

- Efeito do diâmetro da barra

A partir da Figura 37, pode-se observar que a influência do diâmetro da barra se mostrou significativa no comportamento da aderência, em que, tanto para o concreto sem fibras (CR) como para o concreto com fibras (CF), foi obtido um aumento na tensão de aderência à medida que o diâmetro aumentava.

Para o concreto sem fibras, analisando o diâmetro de 10 mm, foi constatado que houve um acréscimo na tensão máxima de aderência equivalente a 8,7% quando comparado à barra de 12 mm. Já quando se compara a barra de 12 mm com a de 16 mm, observa-se que esse acréscimo correspondeu a 2,7%, ou seja, um aumento menos significativo.

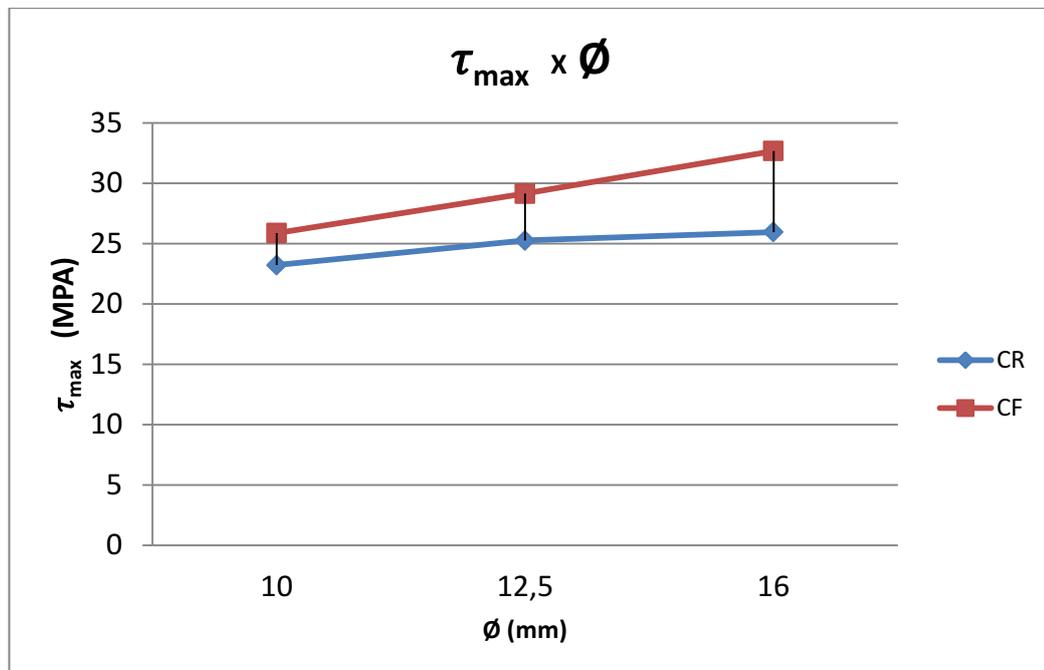
Já para o concreto com fibras, analisando a barra de 10 mm, constatou-se que, comparada ao diâmetro de 12,5 mm, um acréscimo na tensão máxima de aderência também ocorreu, correspondente a 12,6%. Porcentagem esta que representou valores semelhantes quando se é comparada a barra de 12,5 mm com a de 16 mm, onde o aumento foi equivalente a 12,15%.

Logo, foi possível observar que a tensão máxima de aderência sofreu variações de acordo com o diâmetro da barra utilizada, e que, para o concreto com fibras, essas variações mostraram-se maiores e equivalentes, atingindo praticamente o mesmo percentual à medida que o diâmetro aumentava. Simplício (2008) também observou que para a mistura de concreto

comum, sem adição de fibras, a influência do diâmetro da barra não era tão significativa quanto à mistura de concreto com fibras. Para ele, no concreto sem fibras houve um acréscimo na tensão para barras de 10 mm comparadas as de 12,5 mm, comportamento contrário quando se analisa as barras de 12,5 mm com as de 16 mm, que apresentaram uma diminuição na tensão. Já para o concreto com adição de fibras igual a 0,5%, o autor pôde constatar uma influência maior do diâmetro na tensão máxima de aderência, porém, todas inferiores a 20%.

Embora alguns autores tenham constatado que um aumento no diâmetro da barra implica numa diminuição na tensão máxima de aderência, por motivos de um maior diâmetro estar relacionado a uma zona de transição mais porosa, tendo em vista uma maior retenção de água de amassamento presente na interface barra-concreto, implicando numa maior propensão ao esmagamento ou cisalhamento do concreto em contato com as nervuras da barra, autores como Barbosa (2001), obtiveram resultados semelhantes aos encontrados nesta pesquisa. Como explica a autora, o enfraquecimento da ligação existente entre barra e concreto está mais relacionado ao adensamento do mesmo do que a espessura da zona de transição aço-concreto.

Figura 37 - Relação entre o diâmetro da barra e a tensão máxima de aderência



Fonte: Própria

- Efeito das fibras

A Tabela 14 indica os valores de tensões máximas obtidas para os concretos sem e com fibra. Além disso, é apresentada a relação entre essas tensões $\tau_{\max,CF}/\tau_{\max,CR}$. É possível observar um aumento expressivo na tensão máxima de aderência dos concretos com fibra comparados aos sem fibras, onde a relação $\tau_{\max,CF}/\tau_{\max,CR}$ variou de 1,11 a 1,26.

Resultados semelhantes foram encontrados por Simplício (2008), o qual constatou, para os três percentuais de fibra estudados (0,5%, 0,75% e 1%), um aumento significativo na tensão máxima de aderência quando adicionadas fibras de aço ao concreto, salvo para alguns modelos utilizados com 1% de fibra que apresentaram resultados inferiores aos corpos-de-prova com percentuais menores, onde, segundo o autor, esse fato pode ser justificado tendo em vista que um maior volume de fibras na mistura faz com que a mesma tenha mais dificuldade de adensamento, podendo provocar essas discrepâncias nos resultados. Já Melo (2016) observou que a adição de fibras de aço gerou comportamentos diversificados, com aumento, redução e valor aproximado da $\tau_{\max,CR}$. Fato este que também pode ser justificado tendo em vista que apesar de teoricamente a fibra ser distribuída homogênea na mistura, o percentual de fibra em corpos-de-prova de um mesmo traço podem ser diferentes.

Tabela 14 - Variação da tensão máxima para os concretos sem e com fibra

\emptyset (mm)	Tipo de concreto	$\tau_{\max,CF}$	$\tau_{\max,CF}/\tau_{\max,CR}$
10	CR	23,22	1,00
	CF	25,88	1,11
12,5	CR	25,25	1,00
	CF	29,14	1,15
16	CR	25,95	1,00
	CF	32,68	1,26

Fonte: Própria

- Forma de ruptura

Todos os corpos-de-prova ensaiados romperam por arrancamento da barra. Para os casos de barras lisas, este tipo de ruptura é recorrente, tendo em vista as irregularidades da superfície serem pequenas. Já para as barras nervuradas, que foram as utilizadas na pesquisa, a ruptura ocorrerá por arrancamento somente nos casos em que as tensões circunferenciais de tração forem contidas pelo confinamento da armadura, decorrente de armaduras transversais ou do próprio concreto. No caso analisado, pode-se concluir que a ruptura por arrancamento ocorreu devido o confinamento do concreto. Segundo autores como Eligehausen et al. (1982), quando a relação c/\varnothing , onde c corresponde ao cobrimento da barra e \varnothing o diâmetro da mesma, for maior que 5, ocorrerá certo confinamento no trecho da barra aderido ao concreto, fato este que pôde ser constatado experimentalmente na pesquisa.

A fim de se obter comparações entre os resultados experimentais dessa pesquisa e os valores teóricos, adquiridos a partir da expressão exposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014), foi gerada a Tabela 15, onde, para determinação da tensão de aderência, de acordo com a NBR 6118, adotou-se a resistência à compressão obtida experimentalmente.

Tabela 15 - Resultados experimentais e teóricos

Concreto	Experimental			NBR 6118	
	\varnothing (mm)	f_{cm} (MPa)	τ_{max} (MPa)	f_{cm} (MPa)	τ_{max} (MPa)
	10		23,22		4,79
CR	12,5	53,69	25,25	53,69	4,79
	16		25,95		4,79
	10		25,88		5,10
CF	12,5	58,69	29,14	58,69	5,10
	16		32,68		5,10

Fonte: Própria

A partir dos resultados apresentados é possível constatar que os valores teóricos encontram-se abaixo dos experimentais, tanto para o concreto com fibras como para o sem fibras. Este fato possivelmente ocorre devido à norma não especificar o deslizamento relativo à tensão de aderência, ou seja, um parâmetro importante, e como todos os outros, devem ser considerados, a fim de se obter uma comparação mais próxima possível da realidade.

Embora os resultados desta pesquisa não apresentem o deslizamento para as respectivas tensões, Simplício (2008) realizou estas comparações, utilizando um deslizamento da barra igual a 0,1mm e pôde observar que mesmo para um pequeno deslocamento, os valores fornecidos pela norma também se encontravam abaixo das tensões máximas experimentais.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

A pesquisa consistiu em estudar a influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência entre o aço e o concreto de alto desempenho. A partir de resultados experimentais foi possível obter comparações com pesquisas já realizadas, bem como resultados teóricos, obtidos pela expressão da ABNT NBR 6118/2014. A variação que ocorreu com algumas pesquisas anteriores deve-se ao fato da tensão máxima de aderência ser influenciada por diversos fatores, como a composição dos materiais empregados. Logo, por tratar-se de um fenômeno complexo, a aderência deve ser analisada cautelosamente, considerando todas as condições a qual está submetida.

Nos tópicos seguintes serão apresentadas as conclusões obtidas a partir dos resultados dessa pesquisa:

- Em relação à resistência à compressão dos concretos, foi possível constatar que a incorporação de fibras ao concreto resultou em um aumento significativo na resistência média à compressão do mesmo, equivalente a 9,3%. E que, além disso, os corpos de prova com adição de fibra apresentaram uma ruptura menos brusca que os puros, com destacamento das placas de concreto menos intenso, fato este que indica um possível aumento da ductilidade do concreto após adição das fibras;
- No que se refere ao efeito do diâmetro da barra na tensão máxima de aderência foi possível observar uma influência significativa, onde, para ambos concretos analisados, com e sem fibra, notou-se um aumento na tensão à medida que o diâmetro aumentava, valendo salientar que para o concreto com fibras, essa influência mostrou-se maior;
- No tocante à influência da adição de fibras na tensão máxima de aderência, foi observado um aumento quando comparado o concreto sem fibras ao com fibras, onde o incremento de tensão variou de 11% a 26%;
- Quanto à forma de ruptura, todos os corpos-de-prova analisados apresentaram ruptura por arrancamento, comportamento típico dos blocos analisados na pesquisa, que geram um confinamento considerável em torno da barra;
- Os valores de tensão de aderência calculados pela expressão da NBR 6118 apresentaram resultados inferiores quando comparados aos experimentais, fato este que indica uma possível subestimação dos valores prescritos pela norma.

CAPÍTULO 6

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O comportamento da aderência entre o concreto e barras de aço consiste num fenômeno complexo, logo, necessita de muitos estudos a fim de minimizar as lacunas atualmente encontradas, principalmente no tocante ao concreto de alto desempenho. Então, tendo em vista as inúmeras variáveis que possuem influência na aderência entre esses materiais, as seguintes sugestões são expostas:

- Aumentar o número de corpos de prova por variável analisada;
- Realizar outros tipos de ensaio a fim de compará-los com o *push-out test*;
- Analisar a influência de outros tipos de fibra na aderência aço-concreto;
- Contemplar uma investigação com outros tipos de variáveis que influenciam na aderência aço-concreto, como posição das barras na concretagem, velocidade e tipo de carregamento;
- Realizar medição do deslizamento em função da tensão de aderência;
- Desenvolver uma modelagem numérica para determinação da curva tensão de aderência x deslizamento.

CAPÍTULO 7

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 256 p.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. **Rio de Janeiro, 2009**;

_____. **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 7217**: Agregados — Determinação da composição granulométrica. **Rio de Janeiro, 1987**

_____. **NBR 7477**: Determinação do Coeficiente de Conformação Superficial de Barras e Fios de Aço Destinados a Amadura de Concreto Armado. São Paulo, 1982.

ABRAMS, D. A. “**Test of Bond Beteen Concrete and Steel**”. University of Illinois bulletin, Vol. 11, 1913.

ABRISHAMI, H. H.; MITCHELL, D. **Analysis of bond stress distributons in pull-out specimens**. ASCE, Journal of Structural Engineering v.122, n.3, 1996.

ACETTI, K. M.; PINHEIRO, L. M., *Tipos de fibras e propriedades do concreto com fibras*. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 42, 2000, Fortaleza. Anais. Fortaleza: IBRACON, 2000.

AGARWAL, B. D.; BROUTMAN, L. J. **Analysis and performance of fiber composites**. John Wiley & Sons, Inc. second edition, 1990, 449p.

AITCIN, Pierre-Claude. **Concreto de Alto Desempenho**. Trad. Geraldo G. Serra. São Paulo: Pini, 2000.

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (2003). **ACI 408R-03** Reported by ACI COMMITTEE 408. Bond and development of straight reinforcing bars in tension. Farmington Hills.

ARAÚZ, A. C. **Resistência ao cisalhamento em vigas de concreto armado reforçado com fibras de aço**. 2002. Dissertação (Mestrado em Estruturas). UNICAMP, Campinas.

BALAGURU, P. N. & SHAH, S. P. **Fiber Reinforced Cement Composites**. Mc Graw Hill Book Co. New York, 1992.

BELGO BEKAERT. **Catálogo de fibras de aço Dramix**. Disponível em: <http://www.belgobekaert.com.br/Produtos/Documents/Catalogo-Dramix.pdf>. Acesso em 22/06/2017.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. New York: Elsevier Science Publishers, 1990.

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência**. 2001. 215p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. LTC – Livros Técnicos e Científicos. 5ª Edição. Rio de Janeiro, 2002.

CÁNOVAS, M. F. *Panorama Actual de los hormigones reforzados con fibras de acero. Universidad Politécnica de Madri.* In: **IV Congreso Iberoamericano de Patología das Construções – CONPAT 97, VI Congresso de Controle de Qualidade.** Porto Alegre, RS, Brasil. 21 a 24 de outubro de 1997, Vol. II, Anais p. 31 - 46.

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

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

COMITÊ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON (2012). **Bulletin d'Information no. 65:** CEB-FIB Model Code 2010. Paris.

CONCRETO: **Ensino, Pesquisa e Realizações** / Ed. G.C.Isaia. – São Paulo: IBRACON, 2005. 2v.

DING, Yining et al. Fibres for enhancing of the bond capacity between GFRP rebar and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 303-312, 2014;

DUMÊT, T. B. – **Bond of strands embedded in plain and steel fiber reinforced high strength concrete.** São Carlos, 2003. Thesis (Doctorate). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 490 pp.

ELIGEHAUSEN, V., POPOV, EGOR P., BERTERO, VITELMO, V – **Local Bond-slip Relationship of Deformed Bars Under Generalized Excitations** – Report n° UCBEERC 83/23, University Of California, USA, 1983;

FANG, C. ET AL. (2004). Corrosion influence of bond in reinforced concrete, **Cement and Concrete Research**, v34, n.11, p.2159-2167.

FERREIRA, L. E. T. **Sobre a Resistência ao Fraturamento do Concreto e do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**, 2002. 261 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

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. *Concreto reforçado com fibras*. 2011. **Tese (Livre-Docência)** – Escola Politécnica de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo.

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. 667-76, abr./maio/jun. 2008.

FITESA (2017), disponível em: <<http://fitesa.com.br>>. Acessado em: 20/05/2017

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

FUSCO, P. B. **Técnica de armar as estruturas de concreto**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2013;

GARCEZ, E. A. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.

GAVA, G. P. **Análise teórica-experimental do comportamento à flexão de vigas de concreto reforçado com fibras de aço**. Florianópolis, 2006. 282 p. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**, Universidade Federal de Santa Catarina.

GETTU, R.; GARDNER, D. R.; SALDIVAR, H.; BARRAGÁN, B.E. *Study of the distribution and orientation of fibers in SFRC specimens*. **Materials and Structures**, 38, 2005, p.31 – 37.

HULL, D.; **An Introduction to Composite Materials**, Cambridge University Press, Cambridge, 1981 – citado por CALLISTER, 1997.

KHANDAKER, M.; HOSSAIN, A. (2008). Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n.7, p. 1491–1499.

LEONHARDT, F.; MONNIG, E. (1977). **Construções de concreto: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado**. v1. Rio de Janeiro: Interciência.

LIAO, K.; SCHULTHEISZ, C. R.; HUNSTON, D. L. et al. *Long-term durability of fiber-reinforced polymer-matrix composite materials for infrastructure applications: A review* **Journal of Advanced Materials**, v.30, n.4, p. 3-40, 1998.

LORRAIN, M.; BARBOSA, P. M. (2008). Controle de qualidade dos concretos estruturais: ensaio de aderência aço-concreto. **Revista Concreto e Construções**, São Paulo, v.36, n.51, p.52-57.

MARTINEAU, P., AGOPYAN, V. **Conferência Magna I – Compósitos: material inovador**. In: **Arquimacom**, 2002. São Paulo, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

MELO, F. M. C. (2016). **Estudo experimental da aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras**. 183p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016.

NAAMAN, A. E. Development and evolution of tensile strength-hardening FRC composites In: 7th International RILEM Symposim on Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications, 2008, Chennai, India. **Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications**. Babneux – France RILEM Publications S.A.R.L, v.1, p 1 – 28. 2008.

NUNES, L. N.; AGOPYAN, V. **A Influência do Fator de Forma da Fibra na Tenacidade à Flexão do Concreto Reforçado com Fibras de Aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998. Boletim Técnico.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC, UFRGS, Porto Alegre.

REYES, F. E. – **Análise da aderência entre barras de aço e concretos (CC, CAA e CAAFA), sob influência de ações monotônicas e cíclicas**. São Carlos, 2009. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

RIBEIRO, J. L. D. (1985). **Análise experimental dos fatores que influenciam a aderência em barras nervuradas**. 180p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

RILEM-FIB-CEB (1973). Bond test for reinforcing steel. 1. Beam test (7-II-28 D). 2. Pull-out Test (7-II-128). Tentative Recommendations. **RILEM Journal Materials and Structures**, v.6, n.32, p.96-105.

RILEM TC. **AAC 8.2 Push-out test for reinforcement, 1992**. In: RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials, E & FN SPON, 1994;

RILEM RC6, TC9-RC. **Bond test for reinforcement stee: 2. Pull-out test**. RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, 1983;

SANTANA, I. V. – **Estudo da influência das fibras metálicas no comportamento da aderência entre barras de aço e concreto de diferentes classes de resistência**. São Carlos,

2014. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SANTIAGO, M. O. Aplicações do GRC – *Cimento Reforçado com Fibras de Vidro em novos estádios de Sevilha* Espanha. In: **Arquimacom'2002**. São Paulo, 2002.

SILVA, R. D. (2006). **Estudo da aderência aço-concreto em pilares mistos preenchidos**. 152p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SILVA, R. N. **Um estudo sobre o concreto de alto desempenho**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Tecnologia de Engenharia Civil, UEFS, Bahia.

SILVA, B. V. **Proposição de um teste de aderência apropriado para controle tecnológico da resistência à compressão do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2014;

SIMPLÍCIO, M. A. de S. **Estudo sobre aderência entre barras de aço e concreto de alto desempenho reforçado com fibras de aço**, Tese de doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SOYLEV, T. A. The effect of fibers on the variation of bond between steel reinforcement and concrete with casting position. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1736–1746, 2011;

TANESI, J. & AGOPYAN, V. *Compósitos reforçados com fibras plásticas para a construção civil*. **II Encontro Tecnologia de Sistemas Plásticos na Construção Civil**. EPUSP. São Paulo, 1997.

TEZUKA, Y. **Concreto Armado com Fibras**, São Paulo: ABCT. 1997, 1989.

WEILER, B., GROSSE, C. “AUSZIEHVERHALTEN VON FASERN in STAHL FASERBETON. **Otto-Graf Journal**, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland, 1996.

ZUO, J.; DARWIN, D. (2000). Bond slip of high relative rib area bars under cyclic loading, **ACI Structural Journal**, v.97, n.2, p.331-335.