



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DO CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO
UTILIZANDO O METACAU LIM**

Aluno: Francisco de Assis Vicente Júnior

Orientador: Prof. DSc. Marcos Antônio de Souza Simplício

Campina Grande – PB

Francisco de Assis Vicente Júnior

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DO CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO
UTILIZANDO O METACAU LIM**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Unidade Acadêmica de
Engenharia Civil como requisito parcial para
a obtenção do título de Graduado em
Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas.

Orientador: Prof. DSc. Marcos Antônio de
Souza Simplicio

Campina Grande - PB,

2017

Francisco de Assis Vicente Júnior

**ESTUDO DA ADERÊNCIA DO CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO
UTILIZANDO O METACAULIM**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado em 05 de junho de 2017.

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Simplício
Orientador

Prof. Dr. José Bezerra da Silva
Examinador interno

Prof. Dra. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Examinador interno

Campina Grande, 05 de junho de 2017.

“A história a cada dia se renova, o despertar faz abrir novos horizontes e o caminho nos leva à felicidade”.

(Francisco de Assis Vicente Júnior)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que sou, por tudo que fui e por tudo que serei.

A minha família, que de forma indireta contribuiu na minha jornada, mim proporcionando apoio, carinho e paciência. Em especial, a minha vó Nenem que mim deu incentivo financeiro e afetivo. In memoriam (Alzira Patrício Vicente) minha vó que não está presente em matéria, mas espiritualmente vive em minha memória e presente em todos os momentos da minha vida.

A minha namorada Robenilda, por acreditar em mim e me incentivar a não desistir dos meus sonhos acadêmicos.

Ao professor, orientador e amigo Marcos Antônio de Souza Simplício, pelo incentivo constante, pela dedicação, pela sabedoria e pelos ensinamentos sobre os percalços da pesquisa.

Ao professor José Bezerra da Silva, pela colaboração e apoio para a minha pesquisa.

Aos funcionários e técnicos de laboratório Edvaldo Pinheiro de Carvalho e Conrado Pereira da Silva, pelo apoio, paciência e suporte para a realização dos ensaios.

A engenheira Maria Silvana Araújo Lira, pelos conhecimentos divididos durante o meu tempo de estágio na obra.

A todos aos colegas de curso que tiveram uma coparticipação dessa empreitada acadêmica.

RESUMO

Com o crescente desenvolvimento da tecnologia, foi possível buscar alternativas que possam melhorar as propriedades dos materiais. Uma das propriedades mais importantes para a caracterização do concreto é a sua resistência à compressão, além disso, o concreto destaca-se por apresentar propriedades, tais como, resistência à tração às intempéries, facilidade de moldagem. A aderência entre o concreto com fibras e barras de aço, no qual as barras atuam aumentando a capacidade de carga do concreto e as fibras no controle da fissuração. A aderência é influenciada por diversos fatores tais como: rugosidade da barra, posição da barra durante a concretagem, diâmetro da barra, resistência do concreto, retração, adensamento, porosidade do concreto, etc. O presente trabalho visa à análise do comportamento da aderência entre barras de aço e concreto reforçado com fibras e metacaulim através do ensaio push-out. Nessa pesquisa foram utilizados corpos de prova prismáticos para avaliação da aderência e barras de aço nervuradas CA-50 com diâmetros de 8; 10; 12,5 e 16 mm, obedecendo o comprimento de ancoragem de 5ϕ . O concreto teve adição do metacaulim e a resistência à compressão de 40 MPa. Os resultados da tensão de aderência apresentados pela norma ABNT NBR 6118/2014 são muito inferiores aos resultados apresentados nos experimentos, mostrando que a norma não é confiável quanto aos valores calculados. O uso do metacaulim apresenta benefícios tais como: diminui o risco de corrosão das armaduras, reduz o custo total de manutenção à reconstrução em proporção inversa ao prazo de vida útil, evita o surgimento de patologias do concreto, entre outros.

PALAVRAS CHAVE: Propriedades, Fissuras, Ancoragem.

ABSTRACT

With the increasing development of the technology, it was possible to look for alternatives that could improve the properties of the materials. One of the most important properties for the characterization of the concrete is its compressive strength. In addition, the concrete stands out because of its properties, such as tensile strength in the weather and ease of molding. The adhesion between the concrete with fibers and bars of steel, in which the bars act increasing the load capacity of the concrete and the fibers in the control of the cracking. The adhesion is influenced by several factors such as: bar roughness, bar position during concreting, bar diameter, concrete strength, retraction, densification, porosity of concrete, etc. The present work aims at the analysis of the behavior of the adhesion between steel bars and fiber-reinforced concrete together with metakaolin through the push-out test. In this research, prisms were used to evaluate the adhesion and CA-50 ribbed steel bars with diameters of 8; 10; 12.5 and 16 mm, obeying the anchoring length of 5ϕ . The concrete had addition of the metakaolin and the compressive strength of 40 MPa. The results of the adhesion stress presented by ABNT NBR 6118/2014 are much lower than the results presented in the experiments, showing that the standard is not confident about the calculated values. The use of metakaolin has benefits such as: it reduces the risk of corrosion of the reinforcement, reduces the total cost of maintenance to reconstruction in inverse proportion to the useful life, prevents the emergence of concrete pathologies, among others.

KEYWORDS: Properties, Cracks, Development length.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Regra das misturas (modelo paralelo).	18
Figura 2 – Alguns tipos de fibras de aço.	21
Figura 3 – Fibras de vidro	22
Figura 4 – Fibras de polipropileno.	23
Figura 5 – Fibras de sisal.....	23
Figura 6 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem e com fibras... 24	
Figura 7 – Curvas médias de carga-deflexão obtidas no ensaio de tração na flexão. 28	
Figura 8 – Fendilhamento longitudinal do concreto	30
Figura 9 – Fendilhamento (a) cônico e (b) lateral do concreto.....	30
Figura 10 – Dimensões do corpo de prova do ensaio de arrancamento.....	31
Figura 11 – Posição da amostra para o ensaio push-out.....	32
Figura 12 – Esquema do corpo de prova do ensaio de arrancamento.....	32
Figura 13 – Ensaio de extremidade de viga.....	33
Figura 14 – Aderência por adesão.....	34
Figura 15 – Aderência por atrito.....	34
Figura 16 – Aderência mecânica em barras nervuradas.....	35
Figura 17 – Rugosidade superficial das barras e fios trefilados.....	35
Figura 18 – Formação dos espaços vazios ou poros sob as barras e fios lisos concretadas em posição horizontal devida à segregação e ao acúmulo de água.....	37
Figura 19 – Efeito da resistência à compressão do concreto na resistência da aderência.....	38
Figura 20 – Situações de boa e má aderência para armaduras horizontais.....	39
Figura 21 – Fibras de aço.....	41
Figura 22 – Agregado graúdo: brita 1.....	43
Figura 23 – Curva granulométrica do agregado graúdo.....	44
Figura 24 – Agregado miúdo: areia quartzosa.....	45
Figura 25 – Curva granulométrica do agregado miúdo.....	46
Figura 26 – Metacaulim.....	47
Figura 27 – Dimensão dos corpos de prova utilizadas no ensaio push-out test.....	48

Figura 28 – Fôrma utilizada para confecção dos corpos de prova.....	48
Figura 29 – Uso da mangueira plástica na zona não aderente.....	49
Figura 30 – Mistura do cimento, metacaulim, agregados e fibras de aço.....	49
Figura 31 – Moldagem dos corpos de prova.....	50
Figura 32 – Ensaio do abatimento do tronco do cone.....	51
Figura 33 – Ensaio de resistência à compressão.....	51
Figura 34 – Ensaio para se obter a tensão de aderência.....	52
Figura 35 – Comparação entre a tensão máxima de aderência do concreto com adição de fibras de aço, com o concreto sem adição de fibras.....	54
Figura 36 – Resultados experimentais e teóricos da relação $\tau_{b,máx} / f_{cm}^{2/3}$	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de módulo de elasticidade de CRFA.....	27
Tabela 2 - Resistência de aderência das amostras de arrancamento em CRF	36
Tabela 3 – Características geométricas das barras utilizadas	42
Tabela 4 - Composição dos concretos estudados.....	47
Tabela 5 - Valores da tensão máxima de aderência obtidas nos ensaios de push-out test.....	53
Tabela 6 -Valores experimentais e teóricos (ABNT NBR 6118/2014) de tensão máxima de aderência com fibras de aço.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras.....	19
Quadro 2 – Resultados da caracterização da brita 19.1.....	43
Quadro 3 – Composição granulométrica do agregado graúdo.....	43
Quadro 4 – Composição granulométrica do agregado miúdo.....	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

CP – Corpo de Prova;

CP II Z 32 – Cimento Portland com pozolana;

CTRN – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais;

DMC – Dimensão máxima característica;

MPa – Mega pascal

NBR – Norma Brasileira;

RILEM- Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages;

UAEC – Unidade Acadêmica de Engenharia Civil;

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande.

LISTA DE SÍMBOLOS

ϵ_s	Deformação específica do aço da armadura passiva
R_b	Força de arrancamento da barra de aço
P_t	Pressão transversal
σ_{ct}	Tensão de tração no concreto
σ_{st}	Tensão de tração na armadura
s_r	Espaçamento entre nervuras
τ_u	Tensão última de aderência
τ_b	Tensão de aderência
$\tau_{b,máx}$	Tensão máxima de aderência
$\tau_{b,med}$	Tensão média de aderência
F	Força de arrancamento
F_c	Força de compressão da barra
\emptyset	Diâmetro da barra
l_b	Comprimento de ancoragem
F_y	Tensão de escoamento do aço
f_{bd}	Resistência de aderência de cálculo da armadura passiva
η	Coefficiente para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva
f_{ctd}	Resistência à tração de cálculo do concreto
$f_{ctk,inf}$	Resistência à tração característica inferior do concreto
f_{ctm}	Resistência média do concreto à tração
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{cm}	Resistência média do concreto à compressão
γ_c	Coefficiente de ponderação da resistência do concreto

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	17
2.1.	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1.	Concreto com adição de fibras	18
3.1.1.	Tipos de fibras.....	19
3.1.1.1.	Fibras de aço.....	20
3.1.1.2.	Fibras de vidro.....	21
3.1.1.3.	Fibras de polipropileno.....	22
3.1.1.4.	Fibras de sisal.....	23
3.2.	O compósito e a interação fibra-matriz.....	24
3.3.	Propriedades do concreto com fibras.....	25
3.3.1.	Trabalhabilidade.....	25
3.3.2.	Durabilidade.....	26
3.3.3.	Tenacidade.....	26
3.3.4.	Módulo de elasticidade.....	26
3.3.6.	Desempenho mecânico do concreto.....	27
3.4.	Uso do metacaulim.....	28
3.5.	Aderência.....	28
3.5.1.	Aderência e fissuração.....	29
3.5.2.	Aderência e fendilhamento.....	30
3.5.3.	Tipos de ensaio.....	30
3.5.3.1.	Ensaio pull-out test.....	30
3.5.3.2.	Ensaio push-out test.....	31
3.5.3.3.	Ensaio das quatro barras.....	32
3.5.3.4.	Ensaio de extremo de viga.....	33
3.5.4.	Tipos de aderência.....	33
3.5.4.1.	Aderência por adesão ou aderência química.....	33
3.5.4.2.	Aderência por atrito.....	34
3.5.4.3.	Aderência mecânica.....	34
3.5.5.	Fatores que afetam a aderência aço-concreto.....	35

3.5.5.1. Adensamento do concreto.....	35
3.5.5.2. Características geométricas das barras e das fibras.....	36
3.5.5.3. Posição da barra.....	36
3.5.5.4. Retração do concreto.....	37
3.5.5.5. Diâmetro da barra.....	37
3.5.5.6. Resistência mecânica do concreto.....	38
3.5.6. Situações de aderência.....	39
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1. Materiais.....	41
4.1.1. Cimento portland.....	41
4.1.2. Fibras de aço.....	41
4.1.3. Aço.....	42
4.1.4. Agregados.....	42
4.1.4.1. Agregado graúdo.....	42
4.1.4.2. Agregado miúdo.....	44
4.1.5. Água.....	46
4.1.6. Metacaulim.....	46
4.2. Dosagem do concreto.....	47
4.3. Confeção dos corpos de prova.....	47
4.4. Determinação da consistência.....	50
4.5. Moldagem dos corpos de prova.....	50
4.6. Ensaios.....	51
4.6.1. Ensaios de resistência à compressão.....	51
4.6.2. Ensaios de push-out test.....	52
5. RESULTADOS E DISCURSÕES.....	53
5.1. Resistência à compressão.....	53
5.2. Tensão de aderência.....	53
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
6.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	57
7. EPÍLOGO	58
8. REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o consumo de concreto aumentou significativamente, devido a sua durabilidade, boa resistência à compressão, redução dos custos de manutenção da obra, facilidade de execução, resistência ao fogo, resistência ao desgaste mecânico, entre outros.

Segundo a norma NBR 15530 (ABNT, 2007), o concreto é um material formado por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo e água, com ou sem aditivos, onde sua resistência depende: do consumo de cimento, fator água cimento, grau de adensamento e tipo de agregado. O concreto apresenta comportamento frágil e baixa resistência à tração. Devido a essa fragilidade, o concreto necessita de reforços para melhorar suas propriedades e sua resistência, como por exemplo, as barras de aço para combater as tensões de tração.

Outro bom exemplo de reforços para o concreto são as fibras, elas não são tão eficientes em suportar as tensões de tração como as barras de aço, mas tem um papel fundamental no controle das fissuras, limitando sua abertura. As fibras e as barras de aço têm diferentes papéis a desempenhar no concreto.

O uso da adição do metacaulim, uma pozolana de alta eficiência, proporciona melhorias no desempenho, durabilidade, redução dos impactos ambientais, reduz a porosidade e capilaridade, tomando o concreto mais permeável, inibindo a penetração e ação de agentes agressivos que podem reagir com a pasta de cimento e armadura da estrutura como cloretos e sulfatos. (BELTRÃO; ZENAIDE, 2010).

Para que o aço e o concreto trabalhem juntos de forma satisfatória, é necessário que haja aderência entre ambos e coeficientes de dilatação linear compatíveis. A aderência do concreto com as fibras apresenta uma melhor resistência comparada ao concreto sem fibras, pelo fato de melhorar a tenacidade, e conseqüentemente, a capacidade de deformação na zona pós-fissuração.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência das fibras de aço na aderência entre a barra de aço e o concreto com adição do metacaulim.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito da fibra de aço no concreto;
- Analisar o comportamento da aderência entre barras de aço e o concreto com adição do metacaulim e incorporação de fibras de aço;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

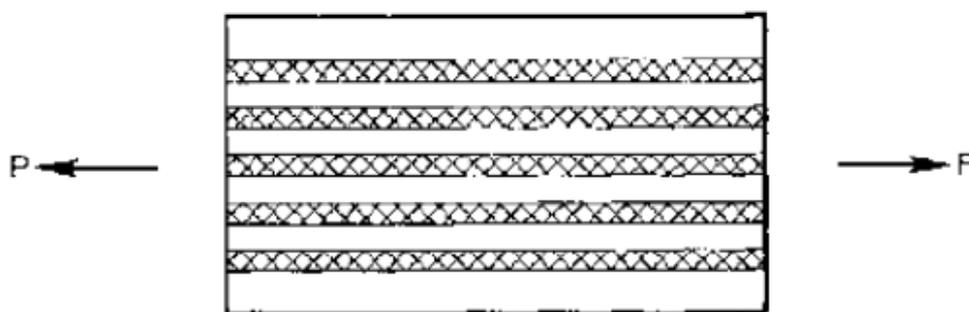
3.1. Concreto com adição de fibras

Na busca de um melhor desempenho do concreto, quando submetido a esforços de tração, tem-se adicionado fibras dispersas ao mesmo. Além do controle de fissuras, as fibras desempenham um papel fundamental de minimizar o comportamento frágil característico desse material. Com isso ocorrem melhorias nas propriedades do compósito, tais como: absorção de energia, ductilidade, controle da fissuração e resistência às ações dinâmicas e estáticas.

O concreto com adição de fibras passa a ser um material pseudo-dúctil, ou seja, continua apresentando uma resistência residual a esforços de tração nele aplicados mesmo após sua fissuração. Diante disso, o material passa a ter exigências específicas para seu controle de qualidade, dosagem e aplicação diferentes do concreto convencional. Em algumas aplicações, o concreto com fibras apresenta vantagens em relação ao convencional, como por exemplo, no revestimento de túneis, pavimentos, pré-moldados entre outros (PASA, 2007).

O concreto com fibras (CF) é classificado como um material compósito e a abordagem desses materiais é geralmente baseada na regra de misturas, ilustrado na Figura 1. Essa regra de misturas só é válida se os dois componentes forem linearmente elásticos e com aderência perfeita entre eles (BENTUR; MINDESS, 2007 apud MELO, 2016).

Figura 1 - Regra das misturas (modelo paralelo).



$$E_c = E_m V_m + E_f V_f$$

compósito = (matriz) + (fibras)

Fonte: Bentur e Mindess (2007) apud Melo (2016).

A aplicação prática de compósitos cimentícios reforçados com fibras na construção é prejudicada pela deficiência de normas pertinentes. O custo de reforço com fibra é certamente um obstáculo para o uso desse material em estruturas comuns. Por outro lado, nota-se o potencial em aplicações estruturais que exigem requisitos especiais.

Atualmente há um número maior de aplicações dos compósitos na engenharia civil, por exemplo, telhas, painéis de vedação vertical, estruturas de concreto como túneis e pavimentos, nos quais o concreto reforçado com fibras vem progressivamente ampliando sua aplicação (FIGUEIREDO, 2000).

Um exemplo de clássico compósito e ainda muito empregado na construção civil no Brasil é o fibrocimento. Trata-se de uma matriz de pasta de cimento reforçada com fibras de amianto. Sua utilização remonta o início do século XX e acabou por se expandir a vários países. Não é empregada em alguns países devido aos riscos que o amianto representa à saúde humana (SIMPLÍCIO, 2008).

3.1.1. Tipos de fibras

Entre as adições utilizadas para melhorar certas características do concreto, as fibras tem tido papel de destaque nos últimos anos, sendo objeto de diversos estudos.

Há vários tipos de fibras disponíveis comercialmente, por exemplo, as de aço, as de vidro, sintéticas e naturais. O Quadro 1 apresenta alguns tipos de fibras e suas características.

Quadro 1 – Propriedades mecânicas de alguns tipos de fibras.

Tipo de fibra	Diâmetro (mm)	Densidade	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento máximo (%)
Acrílico*	0,012-0,104	1,16-1,18	0,27-1	14-19,5	7,5-500
Vidro	0,005-0,15	2,50	2-4	70-80	2-3,5
Carbono*	0,008-0,009	1,90	1-2,6	230	1,0
Nylon*	0,02-0,40	1,10	0,76-0,82	5,17	20
Polyester*	0,02-0,04	1,40	0,72-0,86	17,23	12-15
Polipropileno	0,02-0,04	0,95	0,55-0,76	5	15
Aço	0,10-1	7,84	0,30-2,2	210	0,5-3,5
Sisal	0,01-0,05	1,50	0,8	-	3,0

*Valores para fibras comercializadas nos EUA em 2004

Fonte: SIMPLÍCIO (2008).

De acordo com o quadro 1, as fibras de aço, carbono e de vidro são as que apresentam maior resistência à tração, as fibras de polipropileno, nylon e polietileno podem ser classificadas como fibras de baixo módulo de elasticidade.

As características geométricas das fibras influenciam as propriedades do concreto. As fibras mais longas são mais eficientes no concreto endurecido, mas disso resultará perda de trabalhabilidade no estado fresco. Algumas alternativas podem superar essa dificuldade tais como: modificação da geometria da fibra, tratamento químico na superfície da fibra para melhorar a dispersão no estado fresco e o uso de técnicas especiais de produção (MELO, 2016).

3.1.1.1. Fibras de aço

Segundo Figueiredo (2000), as fibras de aço são classificadas como fibras de alto módulo, então podem ser consideradas como fibras destinadas ao reforço primário do concreto, ou seja, não se resumem apenas para a redução da fissuração e ao aumento na resistência ao impacto do material, mas são capazes de proporcionar um ganho no desempenho mecânico. As fibras de aço atuam na pós-fissuração do concreto, servindo como ponte de transferência de tensão pelas fissuras, possibilitando uma redução na velocidade das mesmas.

Os estudos teóricos iniciais de CRF nos anos 60 tratavam principalmente do comportamento de concreto reforçado com fibras de aço, desde então o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), tornou-se o concreto com fibras mais utilizado. Originalmente elas foram usadas para controle de fissuras, substituindo o reforço secundário em lajes, pavimentos, túneis, bem como em várias aplicações de reparo, seja substituindo o reforço de aço convencional, seja atuando de forma complementar. (MELO, 2016).

Os aços utilizados para fabricação de fibras são geralmente aços carbono ou liga de aço inoxidável, estas últimas são resistentes à corrosão e são utilizadas em ambientes agressivos.

Em relação ao processo de fabricação, as fibras de aço podem ser obtidas por vários processos, dentre os quais, o mais comum é por corte de arame trefilado de aço de baixo teor de carbono. No que diz respeito à geometria das fibras, atualmente existem várias formas: reta ou com ancoragens em forma de gancho ou como pode ser visto na Figura 2 (SIMPLÍCIO, 2008).

Figura 2 – Alguns tipos de fibras de aço.



Fonte: Simplicio (2008).

As fibras atuais têm superfícies rugosas, com deformações ao longo de todo o comprimento da fibra (frisadas) ou nas extremidades (com ganchos), as quais se destinam a melhorar a aderência da fibra na matriz de cimento. A fim de facilitar sua homogeneização na mistura, algumas fibras são reunidas em feixes, utilizando uma cola solúvel em água, que se dissolve durante o processo da mistura (BENTUR; MINDESS, 2007 apud MELO, 2016).

Segundo a norma NBR 15530 (ABNT, 2007), a menor resistência ao escoamento prevista para o aço de fibra, é de 500 MPa. As fibras de aço podem ser classificadas quanto a sua conformação em: tipo A, com ancoragem nas extremidades, tipo C, corrugadas, e tipo R, reta.

Em grande parte as fibras metálicas se apresentam soltas, desse modo, durante a mistura, essas fibras se separam e se dispersam individualmente pela massa, facilitando o processo de mistura com o concreto e evitando agrupamento e má distribuição. No quesito da durabilidade, vale destacar o CRFA quando bem compactado e curado, possui excelente desempenho, desde que haja a interação entre a matriz cimentícia e as fibras. Na maioria dos ambientes quando há corrosão das fibras na superfície do concreto é inevitável, onde vai comprometer a estética do elemento.

3.1.1.2. Fibras de vidro

As fibras de vidro (Figura 3) são normalmente produzidas a partir da sílica, com adição de óxido de cálcio, boro, sódio e alumínio. Isso resulta num material amorfo, que é comercializado na forma de fios têxteis, mantas, tecidos e fios trançados. As fibras de vidro utilizadas em matrizes cimentícias necessitam ser resistentes a álcalis, caso

contrário ocorre a natural deterioração da fibra por parte dos álcalis do cimento (PASA, 2007).

Na década de 50, houve a primeira tentativa de utilização das fibras de vidro na antiga União Soviética, porém as fibras de vidro não tinha resistência a álcalis. Foram necessários maiores estudos para que as fibras se tornassem resistentes às intempéries.

As fibras de vidro têm valores elevados de resistência e módulo de elasticidade, ou seja, caracteriza-se por apresentar certa resistência e muito empregado em aplicações estruturais: não é elétrica, portanto serve como isolante.

Figura 3 – Fibras de vidro.



Fonte: Info Escola.

3.1.1.3. Fibras de polipropileno

As vantagens dessas fibras são a resistência a álcalis, boa resistência à tração e o baixo custo do material. Suas desvantagens são a baixa resistência ao fogo, sensibilidade à luz solar e oxigênio e baixo módulo de elasticidade. As fibras de polipropileno (Figura 4) são produzidas com um elevado grau de orientação, necessário para obtenção das boas propriedades das fibras (MELO, 2016).

Essas fibras controlam a micro fissuração durante o endurecimento da pasta de cimento e, por este motivo, seu uso é recomendado em estruturas de grandes superfícies, como por exemplo, pisos industriais e pavimentos.

Estudos recentes afirmam que a dissipação de energia durante os ciclos de carregamento, as fibras sofrem deslizamentos em relação à matriz. Em flexão, as

fissuras presentes no concreto podem abrir e fechar durante a vibração, resultando em dissipação de energia pelo atrito da superfície da fibra com a matriz (RESENDE, 2003).

Figura 4 – Fibras de polipropileno



Fonte: NEOMATEX.

3.1.1.4. Fibras de sisal

O uso das fibras de sisal, segundo Toledo Filho (1997), ajuda a controlar a retração plástica e prevenir o aparecimento de fissuras individuais de grandes dimensões durante a fase de endurecimento. O sisal tem a capacidade de “cicatrizsar” pequenas fissuras de retração, uma vez em que as fibras naturais podem direcionar o fluxo de umidade através de sua estrutura celular para as faces da fissura, e a partir desse ponto iniciar o processo de “cicatrização”. Outro fator interessante é que as fibras de sisal podem apresentar problemas de durabilidade, devido a sua limitada resistência a ação de ácidos e álcalis, essa alcalinidade pode acarretar a mineralização das fibras e uma consequente redução na tenacidade dos compósitos (Figura 5).

Figura 5 – Fibras de sisal.



Fonte: Public domain pictures.

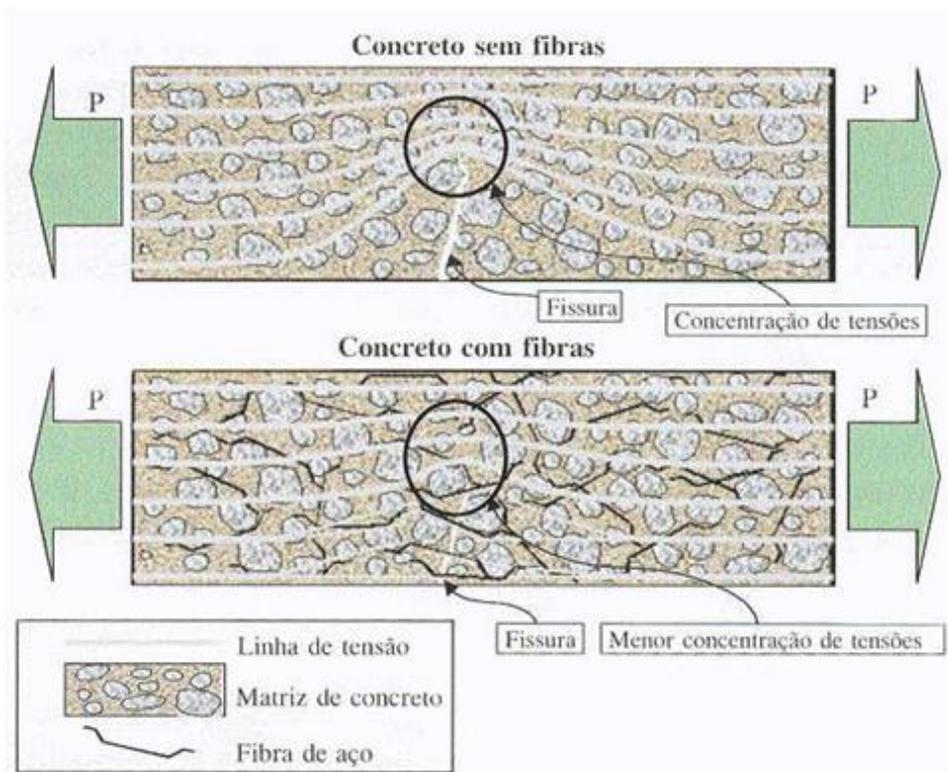
3.2. Compósito e a interação fibra-matriz

A transferência de tensão entre matriz e fibra é influenciada por uma série de fatores, tais como: a condição da matriz, ou seja, antes ou depois da fissuração, propriedades mecânicas da matriz e da fibra, a geometria da fibra, mecanismos de ancoragem e o teor de fibras do compósito.

Quando se trata dos mecanismos dos estágios de carga, ocorrem deslocamentos entre a fibra e a matriz e o mecanismo de transferência de tensão entre ambas passa a ser por atrito, ocorrendo deslocamentos relativos entre a fibra e a matriz. Esse processo tem maior importância na pós-fissuração, onde as fibras atuam como pontes de ligação através de fissuras, controlando as propriedades de resistência e a deformação específica.

Num determinado instante a concentração de tensões causa a ruptura da matriz, o que leva a uma extensão da fissura, sendo este um processo contínuo até a ruptura completa do concreto, caracterizando um comportamento frágil. De modo que não se pode contar com nenhuma capacidade resistente do concreto fissurado (FIGUEIREDO, 2000). A Figura 6 ilustra o esquema de concentração de tensões.

Figura 6 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem e com fibras.



Fonte: Figueiredo (2000).

O trabalho de ponte de transferência de tensão de tração que a fibra realiza através das fissuras no concreto é um mecanismo de aumento de energia associada à ruptura do material e à restrição à propagação das fissuras.

Quando se adicionam fibras de resistência e módulo adequados ao concreto, numa quantidade apropriada (teor), o concreto deixa de ter comportamento frágil. Isso ocorre pelo trabalho de ponte de transferência de tensões, exercido pelas fibras (FIGUEIREDO, 2000).

3.3. Propriedades do concreto com fibras

As fibras de aço ganham destaque pelo fato de possuir baixo módulo de elasticidade e maior relação de aspecto, que são fatores que influenciam as propriedades do concreto.

Além desses, os principais fatores que influenciam as propriedades do concreto com fibras são:

- Características geométricas das fibras;
- Resistência mecânica do material empregado na fabricação das fibras;
- Volume de fibras adicionadas no concreto;
- Resistência da matriz de concreto;
- Tensão de aderência entre as fibras e a matriz;
- Razão entre dimensão máxima do agregado e o comprimento da fibra.

Algumas propriedades do concreto que são modificadas pela adição de fibras são abordadas a seguir.

3.3.1. Trabalhabilidade

As propriedades do CRF no estado fresco são influenciadas pelo fator de forma da fibra, pela geometria, pela dosagem da matriz, pelo volume utilizado e pela aderência entre fibra e matriz. Deve-se ter uma trabalhabilidade adequada, pois essa irá influenciar nas características do concreto endurecido. A adição de fibras de aço pode reduzir o slump, quando comparado ao concreto sem fibras. A perda da trabalhabilidade é explicada pelo fato das fibras absorverem mais pasta de cimento, necessária para

envolver a área superficial da fibra, o que provoca aumento da viscosidade da mistura e a redução do abatimento (SIMPLÍCIO, 2008).

3.3.2. Durabilidade

As fibras atuam na propagação de fissuras no concreto. A partir daí tem-se um aumento da resistência à entrada de agentes agressivos com consequente aumento na durabilidade da estrutura. Portanto, é de se esperar que a estrutura apresente um desempenho superior com relação à durabilidade com a utilização de fibras ao invés da armadura convencional.

3.3.3. Tenacidade

Tenacidade é a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. O concreto convencional se rompe repentinamente, já o concreto com fibras suporta tensões e deformações consideravelmente maiores que o concreto convencional após atingir a tensão máxima (MELO, 2016).

As fibras com melhores características de ancoragem e maior esbeltez levam a maiores valores de tenacidade do que fibras lisas e retas. Para um mesmo tipo de fibras, maiores teores de fibras levam a maior tenacidade.

3.3.4. Módulo de elasticidade

Uma das partes importantes no estado de fibras no concreto é o módulo de elasticidade. De acordo com YAZICI e AREL (2013), no caso das fibras de aço, há um aumento no valor do módulo de elasticidade à medida que se aumenta a quantidade de fibras. Como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de módulo de elasticidade de CRFA.

kg/m ³	l/d = 40			l/d = 80		
	C20	C40	C60	C20	C40	C60
0	26,7	32,1	42,9	26,7	32,1	42,9
10	27,6	32,6	43,8	28,1	33,2	44,1
20	28,0	33,3	44,2	28,3	33,7	44,6
30	28,3	33,7	45,1	29,2	34,1	44,9
40	29,2	34,6	46,1	29,6	35,1	46,0
60	29,8	35,4	46,6	30,2	35,6	47,1
80	30,3	35,8	47,2	30,6	36,3	47,8

Nota: valores em GPa

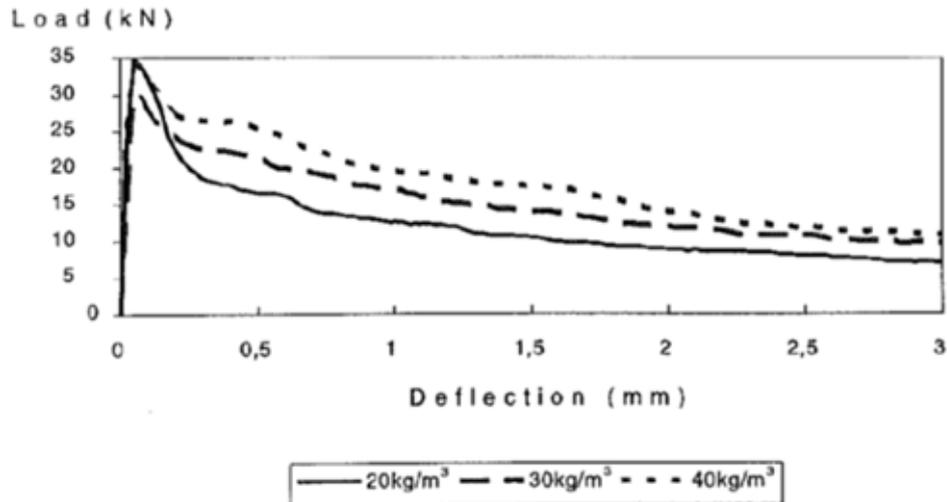
Fonte: Yazici e Arel (2013) apud Melo (2016).

3.3.5. Desempenho mecânico do concreto

As propriedades mecânicas do concreto com fibras são influenciadas por vários fatores: 1) Fibras: tipo, geometria, relação de aspecto, orientação, volume, distribuição; 2) Matriz: resistência, tamanho máximo do agregado; (3) Corpo de prova: tamanho, geometria, método de preparação, a taxa de carregamento entre outros. O adicionamento da fibra no concreto contribui para a sua alteração mecânica, conseqüentemente, esse processo apresenta-se na mesma proporção em diversos tipos de estruturas.

Quanto maior o volume de fibras, maior será o número de fibras atuando como ponte de transferência de tensão ao longo da fissura. Figueiredo (2000), realizou o ensaio de tração na flexão de concretos de f_{ck} de 20 MPa, com diferentes consumos de fibra de aço e apresentou as curvas médias de carga por deflexão, representadas na Figura 7. É possível verificar que o desempenho do compósito, pós-pico de fissuração, é maior para maiores teores de adição, o trecho elástico inicial, no qual ocorre um deslocamento de cerca de 0,04 mm, fica praticamente estável sem sofrer influência significativa do teor de fibras. No entanto, a carga resistida após a fissuração aumenta com o incremento no consumo de fibras.

Figura 7 – Curvas médias de carga-deflexão obtidas no ensaio de tração na flexão.



Fonte: Figueiredo (2000).

3.4. Uso do metacaulim

O metacaulim é obtido pela calcinação de um tipo específico de argila. Essa adição mineral proporciona reatividade com o hidróxido de cálcio presente na pasta de cimento, efeito denominado de reação pozolânica. Essa reação pozolânica reduz a porosidade e o teor de hidróxido de cálcio no cimento, assim melhora a qualidade da zona de transição agregado-matriz, promovendo a melhora de desempenho das propriedades do concreto estrutural relacionadas à resistência mecânica e durabilidade (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

A influência do metacaulim depende, além de sua pureza e reatividade do teor de cimento no concreto e do período e tipo de cura, logo se torna bastante extensa a análise experimental da influência de todas as variáveis envolvidas (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2005).

O uso do metacaulim melhora as propriedades mecânicas dos concretos de cimento Portland, devido as suas características físicas e químicas. O metacaulim ajuda na redução do ar aprisionado e no teor de argamassa (HELENE et.al., 2003).

3.5. Aderência

Aderência é responsável pela solidariedade entre o aço e o concreto, fazendo com que esses dois materiais trabalhem em conjunto (PINHEIRO, 2007).

Ancoragem é a fixação da barra no concreto, para que ela possa ser interrompida. Na ancoragem por aderência, deve ser previsto um comprimento suficiente para que o esforço da barra seja transferido para o concreto. Ele é denominado comprimento de ancoragem (PINHEIRO, 2007).

É a aderência a que garante a compatibilidade de deformações entre concreto e aço, bem como a transferência de esforços de um para o outro. Trata-se de um fenômeno bastante complexo, que ainda não está perfeitamente entendido, envolvendo ao mesmo tempo tensões de tração e compressão, bem como sendo influenciado por fatores de diversas naturezas (SIMPLÍCIO, 2008).

Quando se trata de aderência aço-concreto, há dois principais problemas: o problema da ancoragem da armadura e o da fissuração das peças de concreto. Nas ancoragens, é preciso transferir os esforços da armadura para o concreto adjacente por meio de um comprimento necessário para que essa transferência de tensões ocorra. Para garantir boa aderência, a qualidade do concreto na zona de ancoragem é de suma importância. Quanto ao problema da fissuração das peças de concreto, normalmente pretende-se manter as aberturas das fissuras abaixo de limites preestabelecidos (FUSCO, 2013).

Alguns parâmetros afetam as propriedades de aderência entre o concreto e o aço, dentre eles a densidade do concreto, resistência à compressão do concreto, cobrimento da armadura, tipo de agregado, condições de confinamento, tipo, diâmetro, localização e orientação da barra de reforço, e as adições, tais como pó de sílica ou fibras.

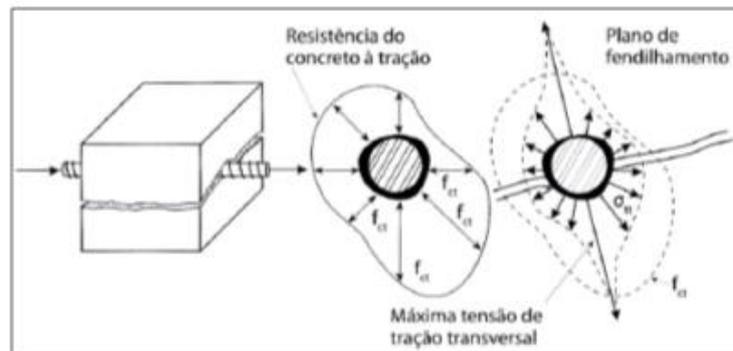
3.5.1. Aderência e fissuração

A aderência entre a armadura e o concreto permite que as tensões de tração possam ser absorvidas pelas armaduras. Quando as solicitações são suficientemente baixas, o concreto ainda é resistente à tração. Diz-se que o concreto está no estágio I. Aumentando-se as solicitações nas fibras mais tracionadas, é atingida a tensão de ruptura do concreto à tração, dando-se então a fissuração na peça, e o concreto passa para o estágio II. Com a passagem do estágio I para o estágio II, nas seções fissuradas a tensão de tração no concreto se anula, e aumenta-se tensão de tração na armadura, atingindo seu valor máximo (FUSCO 2013).

3.5.2. Aderência e fendilhamento

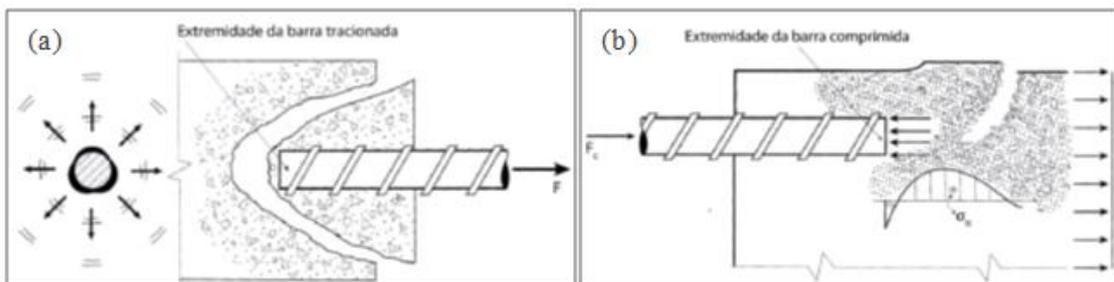
Os esforços de tração transversais mobilizados pelo fenômeno de aderência tendem a provocar o fendilhamento do concreto paralelamente ao eixo da barra de aço, mostrado na Figura 8. Além da tendência ao fendilhamento geral ao longo de todo o trecho da ancoragem por aderência, nas extremidades da barra ancorada existe sempre uma concentração de tensões que tende a produzir um fenômeno local da ruptura. Na Figura 9(a), está mostrado o caso da extremidade das barras tracionadas e na Figura 9(b), o das barras comprimidas.

Figura 8 – Fendilhamento longitudinal do concreto.



Fonte: Fusco (2013) apud Melo (2016).

Figura 9 – Fendilhamento (a) cônico e (b) lateral do concreto



Fusco (2013) apud Melo (2016).

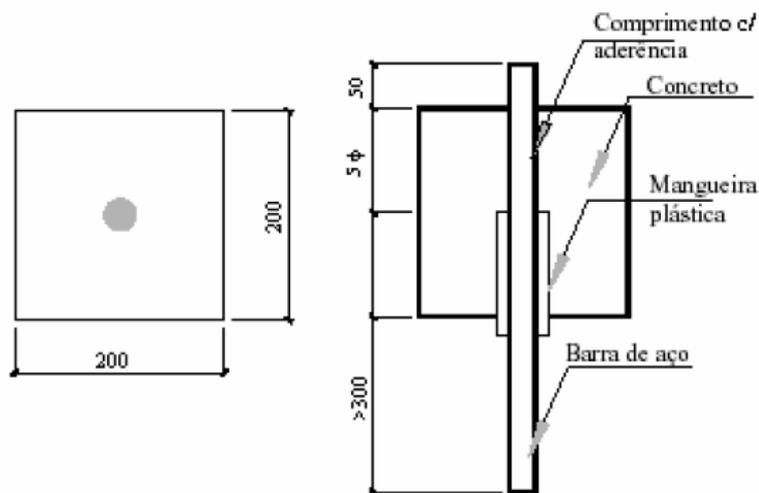
3.5.3. Tipos de ensaio

3.5.3.1. Ensaio pull-out test

O ensaio de arrancamento (pull-out test) é o mais tradicional dos ensaios de aderência, pois consiste na extração de uma barra de aço mergulhada em um prisma de

concreto. A barra é posicionada no centro do prisma, com um comprimento de aderência igual a 5ϕ , como ilustra a Figura 10. Em uma das extremidades é aplicada a carga e na outra são lidos os deslocamentos. As vantagens desse ensaio são a simplicidade do corpo de prova, a execução e a possibilidade de isolar as variáveis influentes na aderência (RILEM RC6, 198 apud MELO, 2016).

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



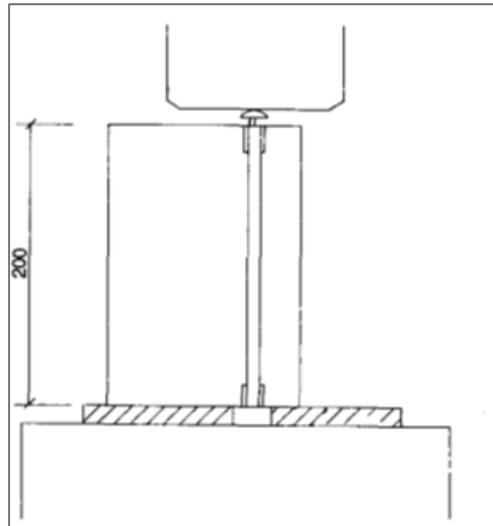
*Dimensões em mm

. Fonte: RILEM RC6 (1983) apud Melo (2016).

3.5.3.2. Ensaio push-out test

O ensaio de push-out consiste em determinar a aderência do aço e do concreto autoclavado (AAC), a amostra do ensaio é feita com um prisma cortado a partir de uma laje reforçada de tal maneira que a seção transversal do prisma corresponda à seção transversal da laje. O ensaio apresenta uma barra acoplada ao prisma AAC, tendo um comprimento definido através de uma força de compressão, porém suas extremidades não mostram tensão. Conforme Figura 11 abaixo, correspondente ao ensaio.

Figura 11 – Posição da amostra para o ensaio push-out em AAC.



Fonte: RILEM AAC 8.2 (1992) apud Melo (2016).

3.5.3.3. Ensaio das quatro barras

É um ensaio de arrancamento do aço no concreto, onde a barra central situada em um dos lados do corpo de prova é tracionada enquanto o mesmo é mantido imóvel pela força reativa distribuída pelas outras três barras, situadas no lado oposto e dispostos no vértice de triângulo imaginário. A Figura 12 ilustra o esquema do corpo de prova com as quatro barras (DUCATTI, 1993).

Figura 12 – Esquema do corpo de prova do ensaio das quatro barras.



Fonte: Ducatti (1993).

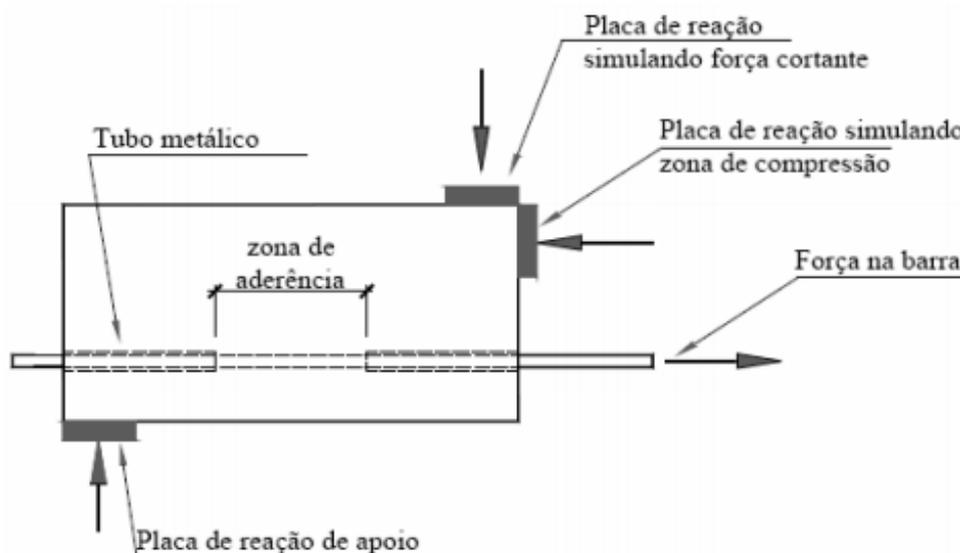
A medida dos deslocamentos da barra central em relação ao concreto é feita por meio de extensômetros fixados ao concreto por um adesivo. As deformações são

medidas por extensômetros elétricos colocados ao longo do comprimento da barra central.

3.5.3.4. Ensaio de extremo de viga

Este ensaio representa a situação de aderência que existe entre uma fissura de flexão-cisalhamento e o extremo de uma viga simplesmente apoiada. Representa uma variação do ensaio de flexão, que consiste em uma barra situada na parte inferior do corpo de prova, que é tracionada, que é tracionada e a reação, que simula a zona de compressão da viga, é aplicada na parte superior do corpo de prova, ilustrada na Figura 13 (FRANÇA, 2004).

Figura 13 – Ensaio de extremidade de viga.



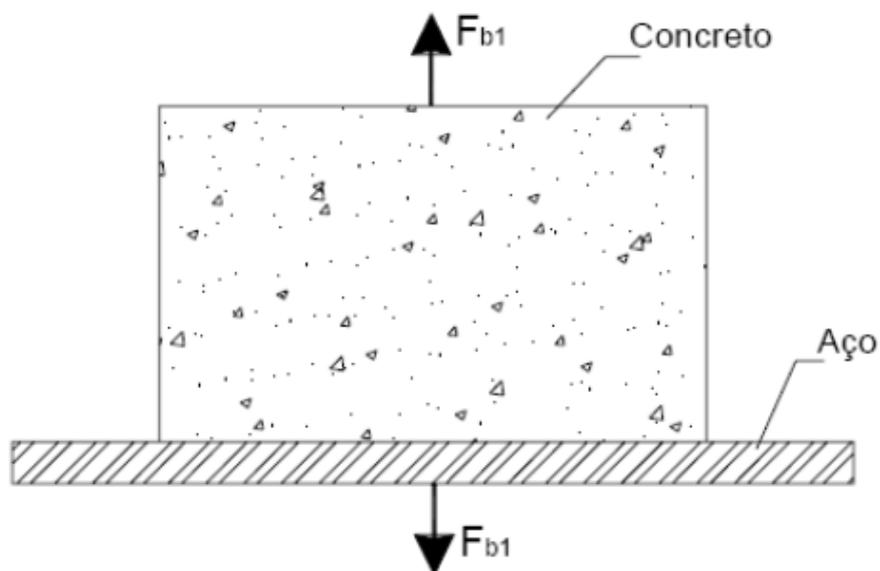
Fonte: França (2004).

3.5.4. Tipos de aderência

3.5.4.1. Aderência por adesão ou aderência química

Segundo Pinheiro (2007), a aderência por adesão apresenta características de resistência de separação dos materiais. Essa característica se dá pela função de ligações físico-químicas, gerada pela reação do cimento onde se faz necessário a aplicação de uma força (F_{b1}) separando os materiais (Figura 14). O processo relativo à barra e a massa de concreto que a envolve promove uma ligação que pode ser destruída.

Figura 14 – Aderência por adesão.

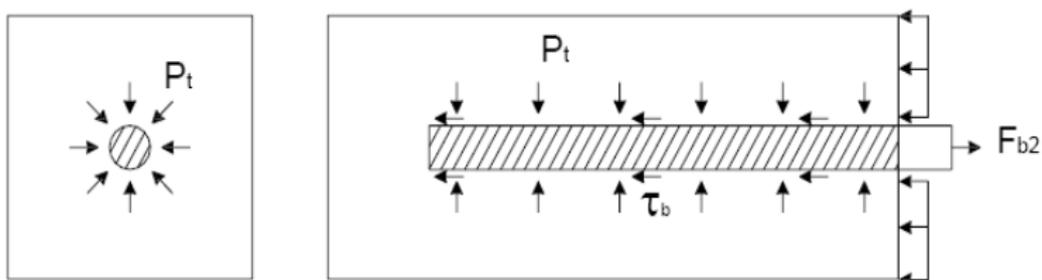


. Fonte: Fusco (2013).

3.5.4.2. Aderência por atrito

A aderência por atrito depende da pressão transversal exercida pelo concreto na barra decorrente da retração. Em ensaios de arrancamento (Figura 15), observa-se que a força devida ao atrito (F_{b2}) é bastante superior aos limites previstos a partir da resistência de adesão (F_{b1}).

Figura 15 – Aderência por atrito.



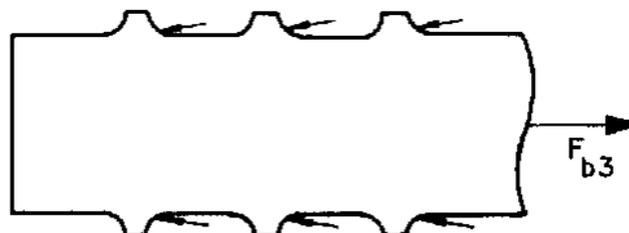
Fonte: Fusco (2013).

3.5.4.3. Aderência mecânica (ou engrenamento)

Na superfície das barras é possível ver através da aderência mecânica à sua conformação superficial. As barras de alta aderência acionam forças localizadas

aumentando significativamente a aderência da mesma (Figura 16). Portanto a aderência mecânica tem sua importância na aderência total.

Figura 16 – Aderência mecânica em barras nervuradas.



. Fonte: Fusco (2013).

A Figura 17, segundo Pinheiro (2007), mostra que mesmo uma barra lisa pode apresentar aderência mecânica, em função da rugosidade superficial, devida à corrosão e ao processo de fabricação, gerando um denteamento da superfície. Para efeito de comparação, são apresentadas superfícies microscópicas de: barra de aço com corrosão, barra recém-laminada e fio de aço obtido por laminação a quente e posterior encruamento a frio por estiramento.

Figura 17 – Rugosidade superficial de barras e fios lisos.



Fonte: Pinheiro (2007).

3.5.5. Fatores que afetam a aderência aço-concreto

A tensão de aderência pode ser definida como sendo a relação entre a força atuante na barra e a superfície da barra aderente ao concreto. Porém existem vários fatores que podem intervir na sua quantificação e influenciar o comportamento da aderência.

3.5.5.1. Adensamento do concreto

O adensamento pode ser crítico para a aderência uma vez que as zonas de ancoragem são pontos onde normalmente se tem uma elevada percentagem de armadura, ocasionando maiores dificuldades de concretagem e, como consequência, maior possibilidade de surgimento de vazios, tornando esta região mais fraca quando solicitada (FRANÇA, 2004).

3.5.5.2. Características geométricas das barras e das fibras

A característica geométrica das barras influencia na tensão de aderência. De acordo com a Tabela 2, a resistência da aderência é bem maior nas barras nervuradas, pelo fato das barras lisas gerarem um maior espaço de vazios no contato do concreto com o aço (MELO, 2016).

Tabela 2 – Resistência de aderência das amostras de arrancamento em CRF

Tipo das barras	Resistência de aderência (MPa)			
	Control	SFRC ($V_f=0,5\%$)	PFRC ($V_f=0,1\%$)	GFRC ($V_f=0,1\%$)
Lisas	2,47	2,35	2,53	2,47
Nervuradas	5,20	6,33	5,01	4,91

Legenda:

Control: concreto sem fibras, FRC: concreto com fibras.

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

Fonte: Melo (2016).

As características geométricas das fibras, tais como fator de forma, comprimento e a forma geométrica, também influenciam o comportamento da aderência entre barras de aço e o CRF.

3.5.5.3. Posição da barra

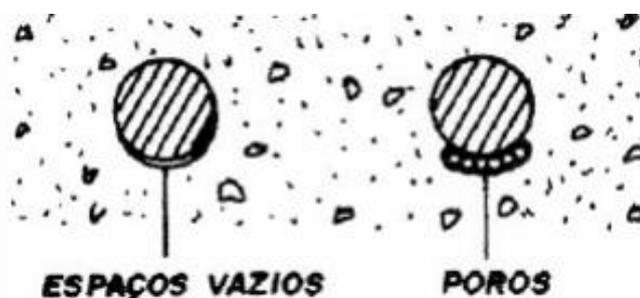
Na concretagem de uma peça tanto no lançamento como no adensamento, o envolvimento da barra pelo concreto é influenciado pela inclinação e posição da barra.

Segundo Barbosa (2001), A tensão de aderência das barras concretadas na posição vertical e solicitadas no sentido contrário à concretagem é maior que a de barras concretadas na posição horizontal ou na vertical solicitadas no mesmo sentido da

concretagem. A exsudação do concreto fresco provoca um acúmulo de água sob as barras, que ao ser absorvida ou evaporar, deixará espaços vazios ou poros, prejudicando a aderência.

As barras concretadas na posição horizontal, no topo da forma, apresentam pior comportamento do que aquelas concretadas no fundo da forma. Isto se deve ao fato de que as barras inferiores situam-se numa zona em que o adensamento é mais acentuado e, portanto, a existência de argamassa porosa na metade inferior das barras é menor, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 – Formação de espaços vazios ou poros sob as barras concretadas em posição horizontal devida à segregação e ao acúmulo de água.



. Fonte: Leonhardt (1979).

3.5.5.4. Retração do concreto

A retração do concreto cria tensões de compressão transversais à armadura e essa compressão resulta no impedimento na deformação do concreto, sendo ocasionada pela presença da barra. Daí para que se tenha o equilíbrio, é necessário que as tensões de compressão gerem tensões de tração longitudinal na região da armadura, com isso aumenta o efeito do fendilhamento decorrente das forças de ancoragem e diminui a tensão de aderência.

3.5.5.5. Diâmetro da Barra

Segundo Ducatti (1993), ao estudar o efeito na aderência de barras nervuradas de diferentes diâmetros, observou-se que a resistência de aderência diminui quando o

diâmetro de barra aumenta. A justificativa para tal fato possivelmente está ligada à espessura da zona de transição, que é mais grossa nas barras de maior diâmetro.

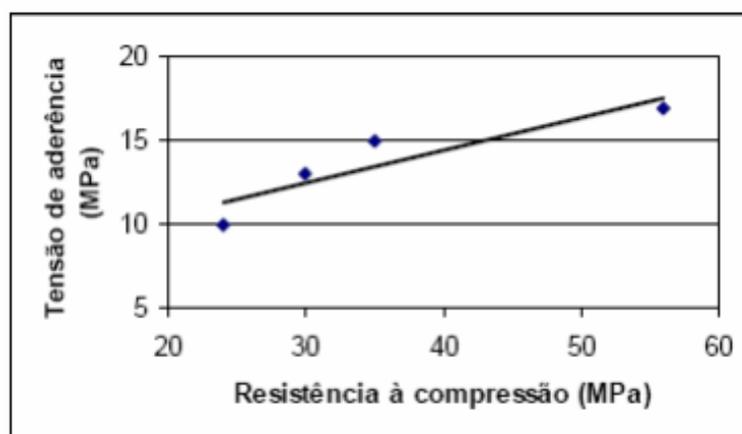
Segundo Barbosa (2001), o aumento do diâmetro das barras reduz a tensão máxima de aderência. Uma justificativa é que a espessura da zona de transição torna-se maior nas barras de maior diâmetro. Com o aumento do diâmetro e a maior altura das nervuras, há uma maior retenção da água de amassamento do concreto na interface barra/concreto, o que aumenta a zona de transição. Como esta região torna-se mais porosa, o esmagamento ou cisalhamento da parte em contato com as nervuras ocorre de forma mais fácil.

3.5.5.6. Resistência mecânica do concreto

A resistência mecânica do concreto é um dos fatores que influencia de maneira mais significativa a resistência de aderência. De modo geral, quanto melhor a qualidade do concreto, em razão da boa dosagem, maiores serão os esforços de aderência que o concreto poderá suportar na interface aço-concreto.

Segundo Ducatti (1993), a tensão última de aderência é proporcional à raiz quadrada da resistência à compressão (Figura 19). Para resistências convencionais, isso pode ser explicado através da proporcionalidade entre resistência à tração e a compressão, visto que os principais mecanismos de aderência são dependentes da fissuração e conseqüentemente da resistência à tração.

Figura 19 – Efeito da resistência à compressão do concreto na resistência da aderência.



Fonte: Ducatti (1993).

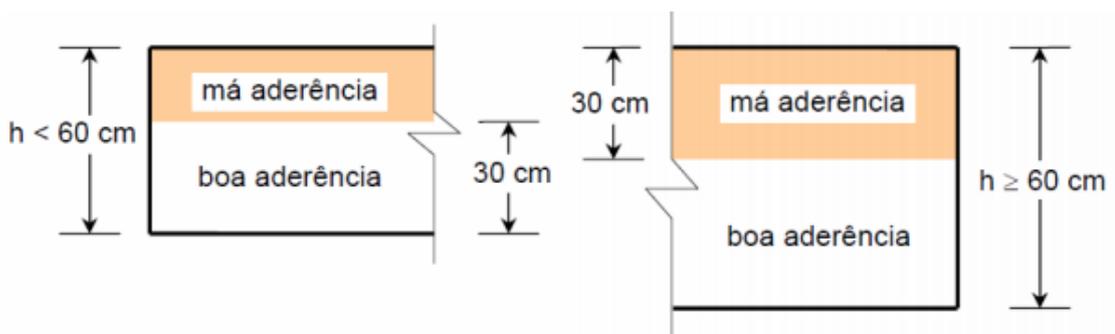
3.5.6. Situações de aderência

Segundo a norma NBR 6118, na concretagem de uma peça, tanto no lançamento como no adensamento, o envolvimento da barra pelo concreto é influenciado pela inclinação dessa barra. Sua inclinação interfere, portanto, nas condições de aderência. Considera-se em boa situação quanto à aderência os trechos das barras que estejam em uma das seguintes posições:

- a) com inclinação maior que 45° sobre a horizontal;
- b) horizontais ou com inclinação menor que 45° sobre a horizontal, desde que:
 - Para elementos estruturais com $h < 60$ cm, localizados no máximo 30 cm acima da face inferior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima;
 - Para elementos estruturais com $h \geq 60$ cm, localizados no mínimo 30 cm abaixo da face superior do elemento ou da junta de concretagem mais próxima.

Nota-se que a resistência de aderência de cálculo depende diretamente da formação superficial da barra, da localização da barra no elemento estrutural, considerando-se as zonas de boa e má aderência (Figura 20), do diâmetro das barras e da resistência à tração de cálculo do concreto f_{ctd} .

Figura 20 – Situações de boa e má aderência para armaduras horizontais.



Fonte: Bastos (2002).

A tensão de aderência de cálculo é dada pela expressão (NBR 6118, 2003, item 9.3.2.1):

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (1)$$

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (2)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ctm} \quad (3)$$

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (4)$$

Onde:

f_{bd} = resistência de aderência de cálculo da armadura passiva;

η_1, η_2, η_3 = coeficientes para cálculo da tensão de aderência da armadura passiva;

$\eta_1 = 1,0$ para barras lisas; $\eta_1 = 1,4$ para barras entalhadas; $\eta_1 = 2,25$ para barras nervuradas;

$\eta_2 = 1,0$ para situações de boa aderência; $\eta_2 = 0,7$ para situações de má aderência;

$\eta_3 = 1,0$ para ϕ (diâmetro da barra) < 32 mm; $\eta_3 = (132 - \phi)/100$, para $\phi \geq 32$ mm;

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo foram:

4.1.1. Cimento Portland

O cimento utilizado para a moldagem dos corpos de prova do programa experimental apresentado foi o CP II Z-32, cujo fabricante é a empresa Montes Claros, sendo proveniente do mesmo lote para as concretagens realizadas. Este tipo de cimento foi escolhido devido ao fato de ser o tipo mais utilizado em obras convencionais. As propriedades físicas do cimento têm-se os seguintes resultados: índice de finura: 1,20 % (ABNT NBR 11578/2013) e massa específica real: 3,10 g/cm³ (ABNT NBR 23/2000).

4.1.2. Fibras de aço

As fibras de aço utilizadas para a pesquisa foram produzidas com baixo teor de carbono, trefilados a frio. A fabricação dessa fibra é no Brasil e são comercializadas em sacos de 20 kg. (Figura 21).

Figura 21 – Fibras de aço.



Fonte: autoria própria.

Durante o processo da utilização das fibras foram adotadas recomendações do fabricante, tais como: a dosagem mínima das fibras foi de 20 kg/m³ de concreto, as fibras foram misturadas após os agregados, o comprimento da fibra não foi superior a 2/3 da espessura do elemento estrutural. O percentual das fibras utilizadas no ensaio foi de 0,5% do volume total de concreto.

4.1.3. 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 8 mm, 10 mm, 12,5 mm e 16 mm. As características geométricas das barras são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Características geométricas das barras utilizadas

Ø (mm)	Altura da nervura (mm)	Distância entre nervuras (mm)
8	0,60 ± 0,05	5,85 ± 0,05
10	1,00 ± 0,05	6,70 ± 0,05
12,5	1,10 ± 0,05	8,05 ± 0,05
16	1,30 ± 0,05	9,80 ± 0,05

Fonte: autoria própria.

4.1.4. Agregados

4.1.4.1. Agregado graúdo

O agregado graúdo adotado foi a pedra britada (Figura 22) de origem granítica, proveniente da pedreira BRITEX, localizada no município de Pocinhos-PB, comercialmente denominada de brita 1.

Figura 22 – Agregado graúdo: brita 1.



Fonte: autoria própria.

Para a brita 19,1 mm, que foi usada para o traço, obtiveram-se os seguintes resultados, listados nos Quadros 2 e 3.

Quadro 2 – Resultados da caracterização da brita 19,1.

Parâmetro Determinado	Valor Médio
Massa Específica Seca	2,80 g/cm ³
Massa Específica Aparente	3,065 g/cm ³
Massa Específica Saturada de Superfície Seca	2,886 g/cm ³
Absorção	3,107 g/cm ³

Fonte: autoria própria.

A curva granulométrica da brita pode ser vista na Figura 23.

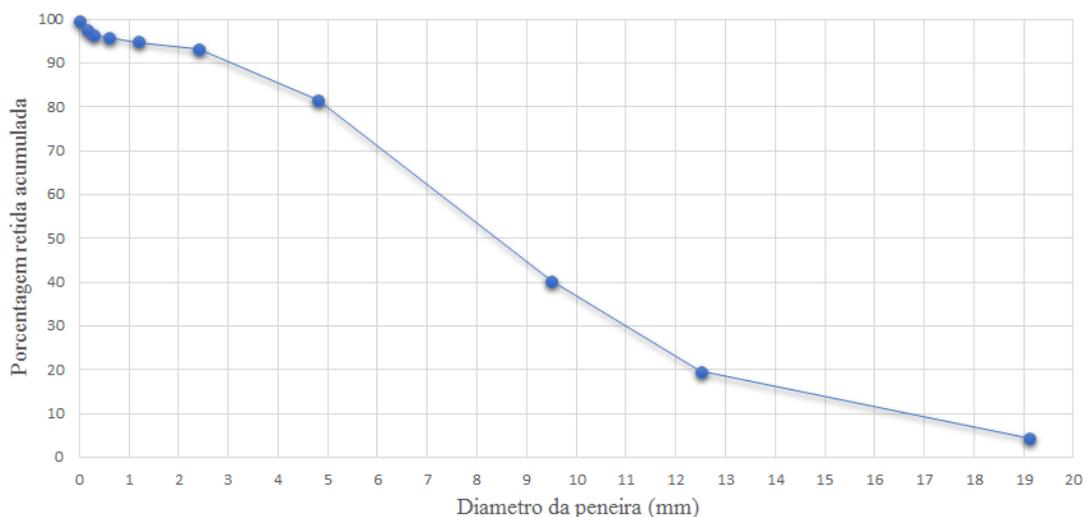
Quadro 3 – Resultados da composição granulométrica do agregado graúdo.

Composição Granulométrica			
Peneiras (mm)	Material Retido (g)	Retida (%)	Acumulada (%)
19,1	131,00	4,37	4,37
12,5	452,05	15,07	19,44
9,5	625,20	20,84	40,28
4,8	1237,40	41,25	81,52
2,4	347,46	11,58	93,10
1,2	51,41	1,71	94,82
0,60	28,60	0,95	95,77
0,30	21,41	0,71	94,48
0,15	29,84	0,99	97,48
Fundo	70,88	2,36	99,48

Módulo de Finura = 7,23
Diâmetro Máximo = 19,1 mm

Fonte: autoria própria.

Figura 23 – Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: acervo pessoal.

De acordo com os resultados apresentados no Quadro 3 observa-se que a composição granulométrica do agregado graúdo, aponta o módulo de finura de 7,23 e diâmetro máximo característico de 19,1 mm. Além disso, realizou-se o ensaio da ABNT NBR NM 53/2003 para encontrar a massa específica do agregado seco de 2.886 g/cm³. 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, atendendo, portanto, a recomendação da norma da ABNT NBR 6136/2014.

4.1.4.2. Agregado miúdo

Para o agregado miúdo foi utilizada areia quartzosa proveniente do leito do Rio Paraíba, ilustrado na Figura 24. De acordo com os resultados obtidos, observa-se que este agregado pode ser utilizado como elemento na dosagem do traço do concreto. E ainda, obtiveram-se resultados para o ensaio da granulometria do agregado miúdo, como se observa no Quadro 4.

Figura 24 – Agregado miúdo: areia quartzosa..



Fonte: autoria própria.

Quadro 4 – Resultados da composição granulométrica do agregado miúdo

Composição Granulométrica			
Peneiras (mm)	Material Retido (g)	Retida (%)	Acumulada (%)
4,8	5,20	0,523	0,523
2,4	56,90	5,72	6,24
1,2	168,40	16,9	23,14
0,60	375,20	37,72	60,86
0,30	285,00	28,65	89,51
0,15	86,30	8,68	98,19
Fundo	17,6	1,77	100,00

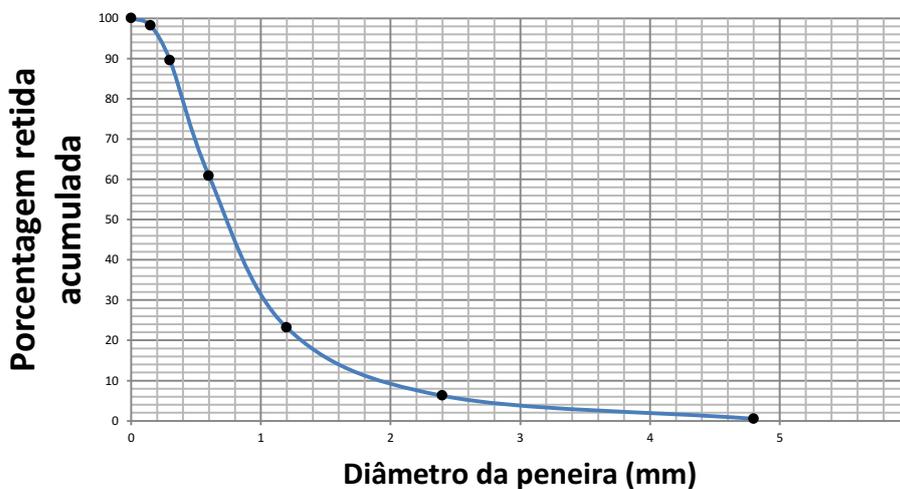
Módulo de Finura = 2,78
Diâmetro Máximo = 4,8 mm

Fonte: autoria própria.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se para o módulo de finura o valor de 2,78%, estando, portanto, dentro da zona ótima de utilização na qual o módulo de finura pode variar de 2,20 a 2,90. E, portanto classificado como areia de granulometria média, pois este valor encontra-se dentro do intervalo de $2,4 < MF < 3,2$ de acordo com a norma da ABNT NBR 7211 (ABNT, 1982). O diâmetro máximo obtido para este agregado é de 4,80 mm. De acordo com os valores obtidos esta areia é considerada bem graduada. A composição granulométrica do agregado miúdo desempenha papel fundamental na preparação de concretos e argamassas. As dimensões do agregado têm efeito direto sobre os vazios, no fator água/cimento e na trabalhabilidade nas misturas de concreto.

A curva granulométrica para o agregado miúdo (areia quartzosa) está ilustrada na Figura 25.

Figura 25 – Curva granulométrica do agregado miúdo.



Fonte: autoria própria.

4.1.5. Água

A água de amassamento empregada na produção dos concretos foi proveniente do abastecimento local do município de Campina Grande - PB. A água é administrada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), a qual tem controle diário da qualidade desta.

4.1.6. Metacaulim

Para o experimento, o metacaulim utilizado foi o de cor alaranjada (Figura 26) e foi aplicado no traço substituindo 10% da massa de cimento foi fabricado pela empresa Soleminas - Indústria e Comércio de Minerais - LTDA. Realizou-se o ensaio normatizado pela ABNT NBR 23/2000 para determinação da massa específica real do metacaulim, obtendo-se o valor igual a $2,65 \text{ g/cm}^3$.

Figura 26 – Metacaulim.



Fonte: autoria própria.

4.2. Dosagem do concreto

Foi adotada para a dosagem do concreto, a resistência característica de 40 MPa aos 28 dias. A dosagem foi feita de forma empírica, observou-se que o traço piloto adotado foi de 0,9: 0,1: 1,91: 2,56: 0,50 (cimento: metacaulim : areia : brita ; a/c). O valor do *slump* (abatimento) adotado foi de 80 ± 20 mm. A Tabela 4 apresenta a composição para se obter a resistência à compressão desejada.

Tabela 4 - Composição dos concretos estudados.

Material	Consumo (kg/m³)
Cimento	369,00
Metacaulim*	41,00
Areia	783,38
Brita 1	1050,60
Água	205,00
a/c (água/cimento) = 0,50	
Traço em massa = 0,9: 0,1: 1,91: 2,56: 0,5	

* substituição de 10% de cimento por metacaulim.

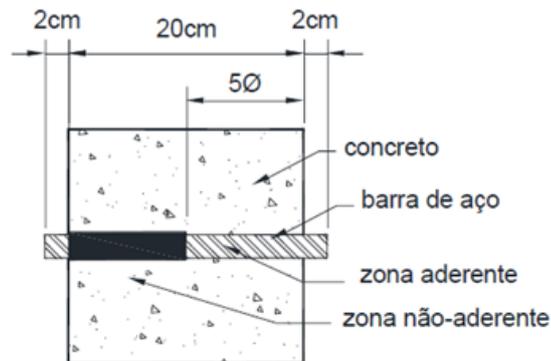
Fonte: autoria própria.

4.3. Confeção dos corpos de prova

Foram moldados 12 corpos de prova num total de dois dias consecutivos. Em cada dia foram confeccionados dois corpos de prova cilíndricos, nas dimensões de 15

cm x 30 cm, para o ensaio de resistência à compressão e quatro corpos de prova prismáticos, nas dimensões de 20 cm x 20 cm x 20 cm, adotando as recomendações do RILEM RC6 (1983) para o ensaio de aderência.

Figura 27 - Dimensão dos corpos de prova utilizados no ensaio push-out test (cm).



Fonte: autoria própria.

No ensaio de push-out, a fôrma foi de madeira plastificada com 10 mm de espessura. Para a garantia de que a barra de aço não tivesse contato com o concreto, foi utilizada uma mangueira plástica (Figura 28). Outra observação a se destacar foi o posicionamento das barras dentro das formas, foi feita de modo a se evitar o desalinhamento das barras com relação ao corpo de prova.

Figura 28 - Fôrma utilizada para confecção dos corpos de prova.



Fonte: autoria própria.

A Figura 29 ilustra detalhe da mangueira plástica usada para confecção dos corpos de prova.

Figura 29 - Uso da mangueira plástica na zona não aderente da barra.



Fonte: autoria própria.

A mistura dos constituintes do concreto foi realizada em betoneira de eixo inclinado. Inicialmente, os materiais secos (cimento, metacaulim, areia, brita e fibras de aço) foram misturados com o objetivo de gerar entre eles uma mistura homogênea (Figura 30), depois se adicionou a água aos poucos até obter-se a consistência desejada.

Figura 30 - Mistura do cimento, metacaulim, agregados e fibras de aço.



Fonte: autoria própria.

4.4. Determinação da consistência

Segundo a NBR NM 67 (ABNT, 1998), o ensaio de abatimento do tronco de cone tem o objetivo de determinar a consistência do concreto fresco através da medida

de seu abatimento (Figura 31), o ensaio foi feito todas as vezes que se realizava uma mistura, obtendo-se um resultado em torno de 80 ± 20 mm.

Figura 31 - Ensaio do abatimento do tronco de cone.



Fonte: autoria própria.

4.5. Moldagem dos corpos de prova

Após obtenção da consistência desejada, realizou-se o adensamento de forma manual, dividindo-se o lançamento em 3 camadas: 40 golpes por camada para os corpos de prova do ensaio push-out e 25 golpes por camada para os corpos de prova do ensaio de resistência à compressão. Após o 24 horas da moldagem dos corpos de prova, ocorreu o processo de desmoldagem e estes foram colocados em processo de cura por imersão de água (Figura 32) onde permaneceram até a idade de 21 dias.

Figura 32 - Moldagem dos corpos de prova.



. Fonte: autoria própria.

4.6. Ensaios

4.6.1. Ensaios de resistência à compressão

Segundo a NBR 5739 (ABNT, 2007), para o ensaio de resistência à compressão, foram utilizados 4 corpos de prova com diâmetro de 15 cm e altura de 30 cm, com idade média de 21 dias. As amostras foram rompidas por compressão axial em uma prensa hidráulica de acionamento elétrico da marca ELE, com célula de carga de 70 toneladas (Figura 33), localizada no Laboratório de Solos e Estrutura (bloco BK) - UFCG. A prensa hidráulica havia sido calibrada dez meses antes do ensaio.

Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão.



Fonte: autoria própria.

4.6.2. Ensaio de push-out test

O ensaio de *push-out* proposto para esta pesquisa foi realizado com corpos de prova prismáticos de concreto, nas dimensões 20x20x20 cm e o comprimento de ancoragem (l_b) de 5ϕ , com idade de 21 dias. Os ensaios foram realizados em prensa hidráulica que mede a resistência a compressão axial, da marca LOSENHAUSEN, com célula de carga de 40 tf, localizada no Laboratório de Solos e Estruturas (bloco BK) – UFCG, conforme ilustração da Figura 34.

Figura 34 - Ensaio para se obter a tensão de aderência.



Fonte: autoria própria.

Com a realização do ensaio, foram obtidas forças aplicadas em função dos deslocamentos. De posse da carga aplicada (F), utilizando a Equação 5 foi calculada a tensão de aderência ($\tau_{b,máx}$).

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot \phi \cdot l_b} \quad (5)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resistência à compressão

A resistência média à compressão (f_{cm}) atingiu o valor de 25,7 MPa aos 7 dias.

A resistência média à compressão (f_{cm}) atingiu o valor de 30,22 MPa aos 21 dias, não atendendo às expectativas quanto à resistência à compressão de 40 MPa.

5.2. Tensão de aderência

Na Tabela 5 são apresentados os valores encontrados no *push-out test* da tensão máxima de aderência ($\tau_{b,m\acute{a}x}$) para o diâmetro de cada barra e para cada moldagem do concreto. Além disso, apresenta-se também a tensão média de aderência ($\tau_{b,med}$).

Tabela 5 - Valores da tensão máxima de aderência obtidos nos ensaios de push-out test

Moldagem	f_{cm} (MPa)	$\tau_{b,m\acute{a}x}$ (MPa)			
		$\varnothing = 8,0$ mm	$\varnothing = 10,0$ mm	$\varnothing = 12,5$ mm	$\varnothing = 16,0$ mm
1	30,22	17,90	14,64	11,00	15,91
		19,89	17,82	11,81	20,64
	$\tau_{b,m\acute{a}x}$ (MPa)	19,89	17,82	11,81	20,64
	$\tau_{b,med}$ (MPa)	18,89	16,23	11,40	18,27

Fonte: autoria própria.

Conforme visto na Tabela 5, existe uma variação na tensão máxima de aderência. Os corpos de prova com barras de diâmetros 10,0 mm e 12,5 mm apresentaram os resultados da tensão de aderência inferior ao de 8,0 mm.

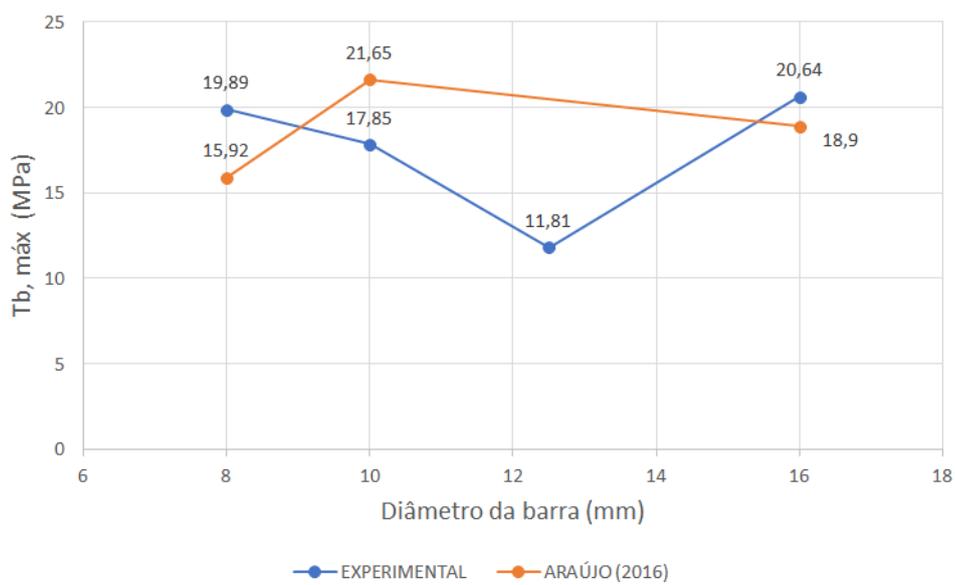
Segundo Simplício (2008), para concreto simples, sem adição de fibras, a tensão máxima de aderência da barra diminui com o aumento do diâmetro.

Segundo Barbosa (2001), com o aumento do diâmetro e altura das nervuras há uma maior retenção da água na face inferior da barra ocasionando a abertura da espessura na zona de transição da barra. Com esse aumento, a região compreendida entre a argamassa e a barra fica mais porosa, facilitando o esmagamento por compressão das nervuras.

Fazendo as comparações dos resultados experimentais com os exposto por Araújo (2016) (Tabela 7), cujos corpos de prova continham metacaulim e eram sem

fibras, podemos destacar que para nos diâmetros de 8 mm e 16 mm, o resultado da tensão de aderência experimental foi maior do que aqueles obtidos por Araújo (2016), com aumento de 20% e 9%. Já para o diâmetro de 10 mm, os resultados experimentais obtidos foram inferiores, com redução de 20% (Figura 35).

Figura 35 – Comparação entre a tensão máxima de aderência do concreto com adição de fibras de aço, com o concreto sem adição de fibras.



Fonte: autoria própria.

Para a determinação da tensão de aderência, com as fibras de aço, segundo a ABNT NBR 6118/2014, foi adotada a resistência média à compressão de todos os corpos de prova, obtendo-se um valor de 30,22 MPa. Os valores calculados para a tensão de aderência estão muito abaixo das tensões máximas experimentais, isso ocorre pelo fato da norma não especificar o deslizamento relativo à tensão de aderência calculada.

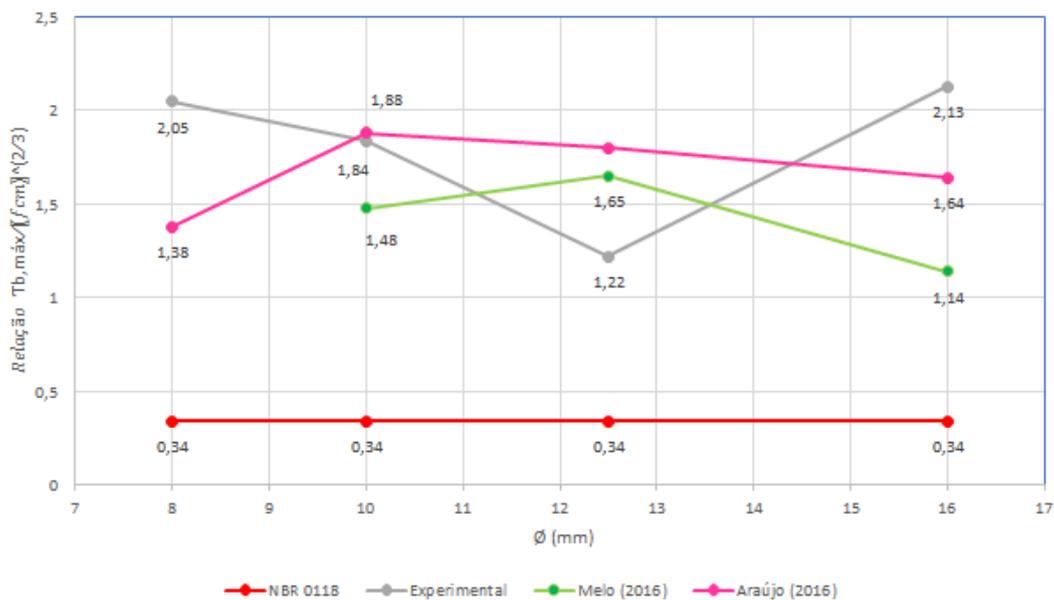
Tabela 6 - Valores experimentais e teóricos (ABNT NBR 6118/2014) de tensão máxima de aderência

	\varnothing (mm)	f_{cm} (MPa)	$\tau_{b,m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{b,m\acute{a}x} / f_{cm}^{2/3}$
Experimental	8,0	30,22	19,89	2,05
	10,0		17,85	1,84
	12,5		11,81	1,22
	16,0		20,64	2,13
NBR 6118	8,0	44,14	4,22	0,34
	10,0		4,22	0,34
	12,5		4,22	0,34
	16,0		4,22	0,34
Melo (2016)	8,0	44,14	-	-
	10,0		18,32	1,59
	12,5		20,66	1,65
	16,0		14,28	1,14
Araújo (2016)	8,0	36,40	15,92	1,38
	10,0		21,65	1,88
	12,5		-	-
	16,0		18,90	1,64

Fonte: autoria própria, com adaptação de Araújo (2016).

De acordo com a Tabela 6, temos que os valores da resistência à compressão foram bastante diferenciados, pode-se notar nos valores encontrados experimentalmente e o valor encontrado por Melo (2016), relacionando a tensão de aderência com $f_{cm}^{2/3}$, adotou-se a relação $\tau_{b,m\acute{a}x} / f_{cm}^{2/3}$ para fazer a comparação com outros resultados experimentais. Analisando a Figura 36, percebe-se que os resultados experimentais apresentaram valores de $\tau_{b,m\acute{a}x} / f_{cm}^{2/3}$ nos diâmetros de 8 mm e 16 mm superiores que nos resultados de Melo (2016) e Araújo (2016). Essas diferenças podem ser atribuídas ao uso das fibras de aço ou adensamento.

Figura 36 – Resultados experimentais e teóricos da relação $\tau_{b,m\acute{a}x} / f_{cm}^{2/3}$.



Fonte: autoria própria.

Analisando os valores experimentais, na Tabela 6, a $\tau_{b,m\acute{a}x}$ da barra de 10.0 mm em relação a barra de 8.0 mm, verifica-se uma redução de 11% para esta associação. Para a barra de 12.5 mm em relação à barra de 10.0 mm, a $\tau_{b,m\acute{a}x}$ reduziu cerca de 51%. Já comparando a barra de 16 mm com a barra de 12.5 mm, a $\tau_{b,m\acute{a}x}$ registrou-se um aumento de 75%.

Alguns pesquisadores relacionam a resistência à compressão com a tensão de aderência, conforme listado na revisão bibliográfica desse trabalho. Assim, teoricamente, o aumento do f_{cm} resultaria um acréscimo no valor da tensão de aderência.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado frisou o estudo experimental da aderência entre as barras de aço e o concreto com fibras utilizando o metacaulim. Fez necessária a comparação dos resultados obtidos nos ensaios push-out com os resultados de outras pesquisas experimentais e com os valores teóricos, obtidos através da ABNT NBR 6118/2014. Ainda foi observada a influência das fibras de aço na resistência da compressão dos concretos. De acordo com os resultados obtidos, pôde-se concluir que:

A adição de fibra de aço ocasionou acréscimo, na tensão máxima de aderência dos concretos com fibras com relação ao concreto sem fibras (comparado com os resultados obtidos por Araújo (2016)).

A variação do diâmetro da barra interfere na tensão de aderência, observou-se que nos diâmetros de 10 mm, 12.5 mm e 16 mm houve uma diminuição na tensão de aderência, ou seja, quanto maior o diâmetro da barra menor será a tensão de aderência.

Os valores da tensão de aderência apresentados pela norma citada, foram muito inferiores aos valores dos resultados experimentais.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Segue aqui algumas sugestões fundamentais para realizações de pesquisas futuras:

- Aumentar o número de corpos de prova para o resultado ser mais expressivo;
- Estudar a aderência de fibras híbridas na matriz cimentícia;
- Estudar experimentos com outros tipos de fibras;
- Realizar ensaios tipo pull-out test e comparar com os ensaios tipo push-out test para verificar qual dos dois tem o melhor desempenho;
- Estudar as variações dos percentuais de adição, a fim de aperfeiçoar as propriedades de ambas as fibras;
- Executar e medir os valores da curva de tensão de aderência x deslizamento;

7. EPÍLOGO

Engenheiro

“Nas estradas de meus sonhos eu fiz pontes de ilusões”

*Nos idos da juventude
trabalhei de apontador
fui, também, agrimensor
cuidei de fazer açude,
e que a lembrança me ajude
nessas minhas construções,
dentre as realizações
relembrar feitos risonhos:*

*Nas estradas de meus sonhos
eu fiz pontes de ilusões.*

*Mourejei do sol a pino
ao romper das madrugadas,
abrindo as rotas traçadas
nas sendas de meu destino,
confrontando medições
e aplicando projeções,
venceram fossos medonhos:*

*Nas estradas de meus sonhos
eu fiz pontes de ilusões.*

*Edifiquei nas alturas
os meus projetos de vida
com a proteção devida
das plantas e arquiteturas.
verdadeiras esculturas
recriei as emoções,
retificando as feições
de meus sorrisos tristonhos*

*Nas estradas de meus sonhos
eu fiz pontes de ilusões.*

Poeta: Ronaldo Cunha Lima

8. REFERÊNCIAS

_____. **NBR NM 23:** Cimento - Determinação da massa específica real do cimento. **Rio de Janeiro, 2000.**

_____. **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 - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. **Rio de Janeiro, 2007.**

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

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto — Especificação. **Rio de Janeiro, 2009.**

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

_____. **NBR 7840:** Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado — Especificação. **Rio de Janeiro, 2007.**

_____. **NBR 11579:** Cimento - Determinação do índice de finura do cimento. **Rio de Janeiro, 2013.**

<<http://www.neomatex.com.br/custo-fibra-polipropileno-concreto>> Acessado em 03/05/2016.

<<http://www.publicdomainpictures.net/viewimage.php?image=14457&picture=&jazyk=PT>> Acessado em 03/05/2016.

<<http://www.infoescola.com/quimica/fibra-de-vidro/>> Acessado em 03/05/2016.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis**. 2006. 310p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Fibras de aço para concreto - Especificação**. NBR 15530. Rio de Janeiro, 2007.

ARAÚJO, N. T. **Estudo experimental da aderência entre barras de aço e concreto com metacaulim** – Trabalho de Conclusão de Curso - TCC – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Campina Grande, 2016.

BARBOSA, M. T. G. Avaliação do comportamento da Aderência em Concretos de Diferentes Classes de Resistência. Tese Doutorado – Universidade federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2001.

BELTRÃO, F. C.; ZENAIDE, J. C. **A influência do metacaulim nas propriedades do concreto** – Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia. Belém, 2010.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. 2.ed. Taylor & Francis, 2007.

CAIRNS, J.; PLIZZARI, G. A. Towards a harmonised European bond test. **Materials and Structures**, v. 36, p. 498-506, 2003.

DANCYGIER, A. N.; KATZ, A.; WEXLER, U. Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers. **Materials and Structures**, v. 43, p. 839–856, 2010.

DANIN. A. R. **Estudo da aderência entre concreto e armadura: Análise da influência das fibras de aço** – Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Mecânica das Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás para obtenção do título de Mestre. Goiânia, 2010.

DUCATTI, V. A. Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP. São Paulo.

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

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto – Uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha** - Dissertação de mestrado. UNESP. Ilha Solteira, SP. (2004).

HELENE, P. et al.. **Estudo da Influência do MetacaulimHP como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland**. São Paulo, 2003.

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

PASA, V. F. **Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos** – Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: PPGEC/UFRGS, 2007.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projetos de edifícios** – Departamento de engenharia de estruturas – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concretos de resistência normal e alto desempenho** – Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

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

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

ROSSIGNOLO, J.A.; AGNESINI, M.V.C. Concreto estrutural leve. Concreto: Ensino, Pesquisas e Realizações, Instituto Brasileiro do Concreto, 2005.

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

SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, Manu. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, p. 603–608, 2007.

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.

YAZICI, S.; AREL, H. S. The effect of steel fiber on the bond between concrete and deformed steel bar in SFRCs. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 299–305, 2013.

TASSEW, S. T.; LUBELL, A. S. Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 215–224, 2014.