

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO DANIEL MORENO COSTA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO EM
PEÇAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM FIBRAS DE AÇO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2017

JOÃO DANIEL MORENO COSTA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO EM
PEÇAS DE CONCRETO REFORÇADAS COM FIBRAS DE AÇO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris.

TOLEDO

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de N° 096

Avaliação da resistência ao cisalhamento direto em peças de concreto reforçadas com fibras de aço

por

João Daniel Moreno Costa

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às **17h30min do dia 10 de novembro de 2017** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof. Dr. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Fúlvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço imensamente o Professor e amigo, Dr. Gustavo Savaris pela sua dedicação e orientação neste trabalho e, por meio dele, eu me reporto a toda comunidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Toledo, pelo apoio.

A todos os colegas de trabalho gostaria de externar minha satisfação de poder conviver com eles durante a realização deste estudo.

Deixo aqui registrado também meu agradecimento aos amigos que fiz ao longo do curso na universidade e que, de alguma forma, me ajudaram muito na realização dos ensaios, em especial Daniel Smaniotto e Valdeir de Caldas Sousa.

Agradeço à Direção da UNIPAR – Universidade Paranaense, *campus* Toledo, pela disponibilização do laboratório para realização dos ensaios, e, ainda, ao laboratorista Alex que me acompanhou e auxiliou durante todos os processos que envolviam a execução dos ensaios.

Também quero prestar minha gratidão à empresa Grace Brasil Ltda. por disponibilizar o aditivo que seria necessário em uma das etapas do presente estudo.

Agradeço aos pesquisadores e professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este trabalho.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família (meu pai Josmar, minha mãe Iraci, e minhas irmãs Graziela e Ana Maria) e parentes próximos, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio, já que nos momentos mais difíceis sempre tive o amparo, orientação e compreensão deles. E por último, e nem por isso menos importante, agradeço a minha namorada Luciane Waskiewicz e seus familiares pelo carinho, amor, compreensão e auxílio.

*“Nenhuma Engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os
melhores engenheiros.”*

(Jordan Lucas)

RESUMO

COSTA, João D. M. **Avaliação da resistência ao cisalhamento direto em peças de concreto reforçadas com fibras de aço**. 2017. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

Este trabalho analisa o comportamento mecânico de peças de concreto reforçadas com fibras de aço. Dezoito peças de concreto prismáticas foram submetidas ao cisalhamento direto até a ruptura ou, quando esta não acontecia, o deslocamento vertical de 2,5 mm foi adotado como variável limite. Adicionalmente, foram ensaiados prismas com o objetivo de caracterizar a contribuição das fibras na resistência ao cisalhamento e no controle do aumento das fissuras do concreto. As fibras de aço utilizadas eram retilíneas, com gancho nas extremidades, de 60 mm de comprimento, diâmetro de 0,75 mm e fator de forma igual a 80, e foram adicionadas nas frações volumétricas de 0,5 e 1,0%; percentuais estes em relação ao volume total de concreto para suas respectivas concretagens. Os resultados mostraram que as fibras contribuíram com o aumento da resistência ao cisalhamento e controlaram satisfatoriamente a abertura das fissuras nas peças de concreto. Os resultados ainda foram comparados com valores obtidos por outros autores que utilizaram fibras de aço, diferentes ou mesmo iguais a este trabalho, como reforço no concreto, tendo sido observado que os valores experimentais atingiram o esperado.

Palavras-chave: Peças de concreto prismáticas. Resistência ao cisalhamento. Fibras de aço. Frações volumétricas.

ABSTRACT

COSTA, João D. M. **Evaluation of direct shear strength in reinforced concrete parts with steel fibers**. 2017. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2017.

This work analyzes the mechanical behavior of concrete parts reinforced with steel fibers. Eighteen prismatic concrete parts were subjected to direct shear till break or, when this was not the case, the vertical displacement of 2,5 mm was assumed as the limit variable. Additionally, prisms were tested with the aim to characterize the contribution of fiber in shear strength and increase control of the cracks in the concrete. Steel fibers used were rectilinear, with hook at the ends, to 60 mm in length, diameter of 0,75 mm and form factor equal to 80, and were added in the volumetric fraction of 0,5 and 1,0%; these percentages in relation to the total volume of concrete to their respective concreting. The results showed that the fibers contributed to the increase of the shear strength and controlled satisfactorily the opening of cracks in concrete parts. The results were compared with values obtained by other authors who used different steel fibers or even equal to this work, as reinforcement in concrete, having been observed that the experimental values reached the expected.

Key words: Concrete prismatic parts. Shear strength. Steel fibers. Volumetric fractions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b) (FIGUEIREDO, 2000).	20
Figura 2 – Fibras para adição em concreto (ONUKEI; GASPARETTO, 2013).	22
Figura 3 – Teoria atrito-cisalhamento: (a) força de atrito agindo entre duas superfícies em contato; (b) tração na armadura transversal devido às suas rugosidades e reação no concreto (Adaptado de BIRKELAND; BIRKELAND, 1966).	28
Figura 4 – Critério de ruptura Mohr-Coulomb, 1773 (apud JUDICE, 2002).	30
Figura 5 – Detalhes do espécime <i>push-off</i> (Adaptado de HOFBECK et al., 1969). ..	32
Figura 6 – Relação entre τ_u e ρ_{wfy} para os modelos inicialmente não fissurados e fissurados (Adaptado de HOFBECK et al., 1969).	33
Figura 7 – Espécimes de teste de transferência de cisalhamento: (a) <i>push-off</i> ; (b) <i>pull-off</i> ; (c) <i>push-off</i> modificado (Adaptado de MATTOCK et al., 1972).	34
Figura 8 – Efeito da tensão direta paralela ao plano de fissuração sobre τ_u (Adaptado de MATTOCK et al., 1972).	35
Figura 9 – Comparação dos valores de τ_u experimentais com os estimados pela Equação (15) (Adaptado de MATTOCK et al., 1972).	36
Figura 10 – Modelos de ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento direto (Adaptado de KHANLOU et al., 2013).	37
Figura 11 – (a) Curvas de carga-deslocamento representativas para feixes CRFA com fibras FE; e (b) com fibras CR (Adaptado de MIRSAYAH; BANTHIA, 2002).	42
Figura 12 – Resistência ao cisalhamento em função da fração volumétrica das fibras FE e CR (Adaptado de MIRSAYAH; BANTHIA, 2002).	43
Figura 13 – Curvas médias de deslocamento vs. carga de corte aplicada para os concretos estudados (Adaptado de MALATESTA; CONTRERAS, 2009).	46
Figura 14 – Peça de concreto para ensaio de cisalhamento direto.	50
Figura 15 – Máquina de ensaios do tipo universal utilizada para romper as peças de concreto.	51
Figura 16 – Esquema do teste de cisalhamento direto.	52
Figura 17 – Instrumentação do deslocamento do plano de cisalhamento.	52
Figura 18 – Resultados obtidos de trabalhabilidade: (a) Concreto sem fibras (C0); (b) Concreto com 0,5% de fibras (C40); e (c) Concreto com 1,0% de fibras (C80).	54

Figura 19 – Relação entre as peças C0, C40 e C80 com seus respectivos valores de tensão de cisalhamento e desvio padrão médios.....	63
Figura 20 – Relação entre tensão cisalhante com deslocamento vertical de três peças de concreto por composição.....	66
Figura 21 – Comparação entre as tensões normalizadas para o percentual de 0% de acréscimo de fibras de aço no compósito.	67
Figura 22 – Comparação entre as tensões normalizadas para o percentual de 0,5% de acréscimo de fibras de aço no compósito.	68
Figura 23 – Comparação entre as tensões normalizadas para o percentual de 1,0% de acréscimo de fibras de aço no compósito.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes	23
Tabela 2 – Propriedades das fibras investigadas	39
Tabela 3 – Detalhes dos espécimes	39
Tabela 4 – Detalhes dos espécimes	40
Tabela 5 – Propriedades das fibras de aço	44
Tabela 6 – Detalhes dos concretos estudados.....	44
Tabela 7 – Resistência ao cisalhamento dos concretos em estudo	45
Tabela 8 – Quantidade de materiais para produção de 1 m ³ de concreto.....	47
Tabela 9 – Principais características do aditivo que foi utilizado no concreto a ser produzido.....	48
Tabela 10 – Propriedades da fibra de aço que foi utilizada.....	48
Tabela 11 – Quantidades de materiais utilizados para produção de 80 litros de concreto.....	49
Tabela 12 – Características dos concretos quanto à trabalhabilidade.	54
Tabela 13 – Características dos concretos quanto à resistência à compressão.	55
Tabela 14 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência à compressão.	56
Tabela 15 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C40 com as de C80 quanto à resistência à compressão.	57
Tabela 16 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência à compressão.	57
Tabela 17 – Características dos concretos quanto à tensão de tração por compressão diametral.	58
Tabela 18 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência à tração por compressão diametral.	59
Tabela 19 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C40 com as de C80 quanto à resistência à tração por compressão diametral.	60
Tabela 20 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência à tração por compressão diametral.	60

Tabela 21 – Resultados obtidos no método de ensaio da norma japonesa SF6 (JSCE, 1990).....	62
Tabela 22 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência ao cisalhamento.....	63
Tabela 23 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C40 com as de C80 quanto à resistência ao cisalhamento.....	64
Tabela 24 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência ao cisalhamento.....	64

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ARI – Alta Resistência Inicial

ASCE – *American Society of Civil Engineers* – Sociedade Americana de Engenheiros Civis

ASTM – *American Society for Testing and Materials* – Sociedade Americana para Ensaio e Materiais

CP – Cimento Portland

CR – Fibra de seção transversal crescente

CRFA – Concreto Reforçado com Fibras de Aço

DMC – Dimensão Máxima Característica

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

FIP – *Fédération Internationale de La Précontrainte* – Federação Internacional de Protensão

IBRACON – Instituto Brasileiro de Contadores

JSCE – *Japan Society of Civil Engineers* – Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis

LTC – Livros Técnicos e Científicos

LVDT - *Linear Variable Differential Transformer* – Transdutor de Deslocamento Variável Linear

MDF – *Medium Density Fiberboard* – Placa de Fibra de Média Densidade

MF – Módulo de Finura

NBR – Norma Brasileira

NCh – Norma Chilena

NM – Normalização no Mercosul

PCI – *Precast Concrete Institute* – Instituto de Concreto Pré-moldado

SFRC – *Steel Fiber Reinforced Concrete* – Concreto Reforçado com Fibras de Aço

SPC – Sobre o Peso de Cimento

UNESP – Universidade Estadual Paulista

UNIPAR – Universidade Paranaense

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

$m-m$ – plano fissurado

V – Esforço cortante horizontal

μ – Coeficiente de atrito

P – Esforço normal perpendicular ao plano de deslizamento paralelo ao plano fissurado

T – Esforço de tração atuante na armadura

$\tan \phi$ – Inclinação equivalente ao coeficiente de atrito

V_u – Esforço cortante horizontal último

T_u – Força de tração última na armadura

A_{sw} – Área da armadura transversal

f_y – Tensão de escoamento da armadura transversal

τ_u – Tensão de cisalhamento última

A_c – Área da interface de concreto

ρ_w – Taxa geométrica da armadura transversal à interface

σ – Tensão normal ao plano de cisalhamento (compressão)

c – Coesão do material

ϕ – Ângulo de atrito interno

σ_1 – Tensão normal maior ao plano de cisalhamento

σ_2 – Tensão normal menor ao plano de cisalhamento

τ_{max} – Tensão máxima de cisalhamento

τ – Tensão de cisalhamento

f_t – Resistência à tração do concreto

f_c – Resistência à compressão do concreto

σ_n – Tensão normal devida à ação das forças aplicadas externamente

τ_0 – Resistência ao cisalhamento do concreto simples

V_f – Fração de volume de fibras em %

K – Variável em função da geometria da fibra

n – Variável em função da geometria da fibra

l – Comprimento da fibra

d – Diâmetro da fibra

D - Altura da peça de concreto

S – Desvio padrão

$f_{c,m}$ – Resistência à compressão média

H_0 – Hipótese inicial no método estatístico do *Teste-t de Student*

μ – Média da 1ª população no método estatístico do *Teste-t de Student*

μ_0 – Média da 2ª população no método estatístico do *Teste-t de Student*

H_1 - Hipótese alternativa no método estatístico do *Teste-t de Student*

α – Nível de significância no método estatístico do *Teste-t de Student*

P – Poder do teste encontrado após a análise das populações pelo método estatístico do *Teste-t de Student*

t – Valor estatístico encontrado após a análise das populações pelo método estatístico do *Teste-t de Student*

$t_{crítico}$ – Valor estatístico tabelado em função do nível de significância considerado no método estatístico do *Teste-t de Student*

$f_{t,m}$ - Resistência à tração média

F_u – Força máxima de ruptura por cisalhamento direto

A_m – Área média entre as duas faces cisalhadas

$\tau_{u,m}$ - Tensão de cisalhamento última média

τ_n – Tensão normalizada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa.....	17
1.2	Objetivo geral	17
1.3	Objetivos específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Concreto reforçado com fibras de aço	19
2.2	Tipos de fibras.....	21
2.3	Classificação das fibras de aço.....	24
2.4	Desvantagens e vantagens do CRFA em relação ao concreto convencional	24
2.5	Transferência de tensões de cisalhamento em interfaces de concreto.....	26
2.5.1	Modelos analíticos existentes para análise da resistência ao cisalhamento.....	27
2.5.1.1	Teoria atrito-cisalhamento	27
2.5.1.2	Critério de ruptura Mohr-Coulomb	29
2.5.2	Ensaio de cisalhamento direto	32
2.5.2.1	Ensaio realizado por Hofbeck et al.....	32
2.5.2.2	Ensaio realizado por Mattock et al.	34
2.5.3	Métodos de determinação da resistência ao cisalhamento	36
2.5.4	Estudos experimentais realizados com CRFA.....	38
2.5.4.1	Ensaio realizado por Mirsayah e Banthia	38
2.5.4.2	Ensaio realizado por Malatesta e Contreras	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1	Materiais empregados.....	47
3.2	Produção do concreto	49

3.3	Características dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto	50
3.4	Procedimentos do ensaio de cisalhamento direto e instrumentação	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Caracterização dos agregados	53
4.2	Caracterização dos concretos	53
4.3	Resistência ao cisalhamento direto.....	61
4.4	Avaliação do deslocamento vertical	65
4.5	Comparação entre os resultados de cisalhamento obtidos experimentalmente com os apresentados na revisão bibliográfica	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1 INTRODUÇÃO

A resistência ao cisalhamento é definida como tensão de corte gerada por forças aplicadas em sentidos opostos, porém em direções semelhantes no material analisado. A tensão última de cisalhamento em um material seria a tensão que o composto pode suportar quando sujeito a cargas de corte em algum ponto específico, no qual podem ocasionar fissuras ou até mesmo ruptura abrupta.

Para quantificar a resistência ao cisalhamento em interfaces de concreto armado foi proposta a teoria atrito-cisalhamento na década de 60 do século passado. Tal teoria assume que a transferência das forças por cisalhamento em uma interface de concreto-concreto ocorre somente por atrito, considerando a influência da armadura transversal à interface e as forças externas que atuam normal ao plano de cisalhamento.

O concreto convencional ainda é o material mais utilizado na construção civil, devido, dentre outros motivos, ao seu baixo custo e a capacidade de se acomodar a distintas condições. Entretanto, tal mistura ainda possui algumas deficiências como a baixa resistência à tração e ao cisalhamento. Como forma de compensar esta deficiência do concreto, pesquisadores propuseram a junção entre o concreto (matriz) e as fibras de aço, originando o compósito concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), uma mistura heterogênea que une de forma adequada as características de seus componentes, trazendo maiores benefícios no comportamento estrutural.

Sabendo-se disso, o CRFA acaba por ser o material que poderá substituir o concreto tradicional em obras que necessitem de suas características especiais, sem esquecer, todavia, que este não possui anos suficientes de aplicação para torná-lo totalmente adequado a qualquer tipo de caso. Logo, ainda existe a necessidade de mais estudos, compreensão e aperfeiçoamento do seu comportamento.

Neste sentido, este trabalho terá como enfoque central avaliar a resistência ao cisalhamento do concreto reforçado com fibras metálicas de aço, verificando os principais condicionantes que demonstram o bom desempenho desse material, como o controle da fissuração que é resultado da influência que as fibras causam na matriz cimentícia, e, assim, comprovar as vantagens de seu uso em relação ao concreto convencional.

1.1 Justificativa

Com o significativo avanço tecnológico nos métodos adotados na construção civil ao longo dos anos, existe o aprimoramento das técnicas para dimensionamento de estruturas. Nesse contexto se insere o estudo da resistência ao cisalhamento, a fim de diminuir significativamente os efeitos negativos que cargas desse tipo possam ocasionar na estrutura, tais como fissuras ou até mesmo ruptura abrupta.

Segundo algumas pesquisas recentes, como as de Mirsayah e Banthia (2002), Malatesta e Contreras (2009), Boulekbache et al. (2012) e as de Araújo et al. (2014), um dos fatores que influencia positivamente na resistência ao cisalhamento em peças de concreto é a adição de fibras, que conferem a este, no estado endurecido, um ganho de desempenho na contenção da propagação das fissuras e redistribuição de tensões. Este comportamento torna interessante o uso deste material quando se deseja uma maior durabilidade pela redução da fissuração.

Com vista a isso, um estudo com efeito comparativo entre um concreto simples e com variação na adição de fibras de aço, logicamente acrescentadas em quantidades adequadas, é válido para verificar o comportamento do concreto e os ganhos que o mesmo pode obter quando se tem o acréscimo das fibras.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é avaliar a resistência ao cisalhamento direto de peças de concreto sem e com adição de fibras de aço em sua mistura.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Pesquisar as metodologias existentes para determinação da resistência ao cisalhamento de peças de concreto;
- Avaliar a utilização do ensaio proposto pela norma da Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis SF6 (JSCE, 1990) para determinar as tensões de ruptura por cisalhamento em peças de concreto;

- Quantificar, analisar e comparar as resistências ao cisalhamento direto e os deslocamentos verticais obtidos ao longo dos ensaios nas peças de concreto prismáticas com diferentes porcentagens de reforço de fibras de aço;
- Comparar os resultados experimentais obtidos com valores encontrados por autores citados na bibliografia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto reforçado com fibras de aço

O concreto simples, mesmo que seja ainda um material muito empregado em vários setores da construção civil, apresenta diversas limitações quando submetido a situações especiais ou mesmo por fenômenos naturais, como é o caso da ação de cargas externas de tração, variações na temperatura e na umidade, efeito da retração hidráulica, no que acaba resultando em várias microfissuras na zona de transição entre a matriz e os agregados graúdos, e assim, por mínima que seja a ação de qualquer força, poderá já ocorrer o aumento destas fissuras (GÓIS, 2010).

A adição de fibras ao concreto, em quantidade apropriada, pode minimizar o comportamento frágil que o concreto simples costuma apresentar (BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

Na medida em que se aumentam os esforços sobre uma estrutura feita de concreto simples, maiores serão as tensões se propagando no interior do concreto. Segundo Figueiredo (2000), o surgimento de fissuras resulta em barreiras à propagação das tensões, e as consequências disso serão o aumento nas fissuras, pois a propagação das tensões possui uma única saída para dar segmento ao seu processo inicial, que será contornar seus caminhos. Assim sendo, as tensões se concentram na extremidade da fissura, provocando o aumento incontrolado destas e, no momento em que os esforços mecânicos forem maiores que a resistência da matriz cimentícia, haverá o rompimento abrupto do material (BARROS, 2009).

No concreto com adição de fibras, haverá o retardamento do aumento da fissura, visto que as fibras tornam-se pontes de ligação na mistura, desempenhando o papel de transferir as linhas de tensões de um lado a outro na matriz e assim diminuindo o acúmulo de esforços nas extremidades das fissuras (GÓIS, 2010).

A Figura 1 a seguir ilustra a diferença e o benefício que se tem quando se compara um concreto sem e outro com adição de fibras em sua composição:

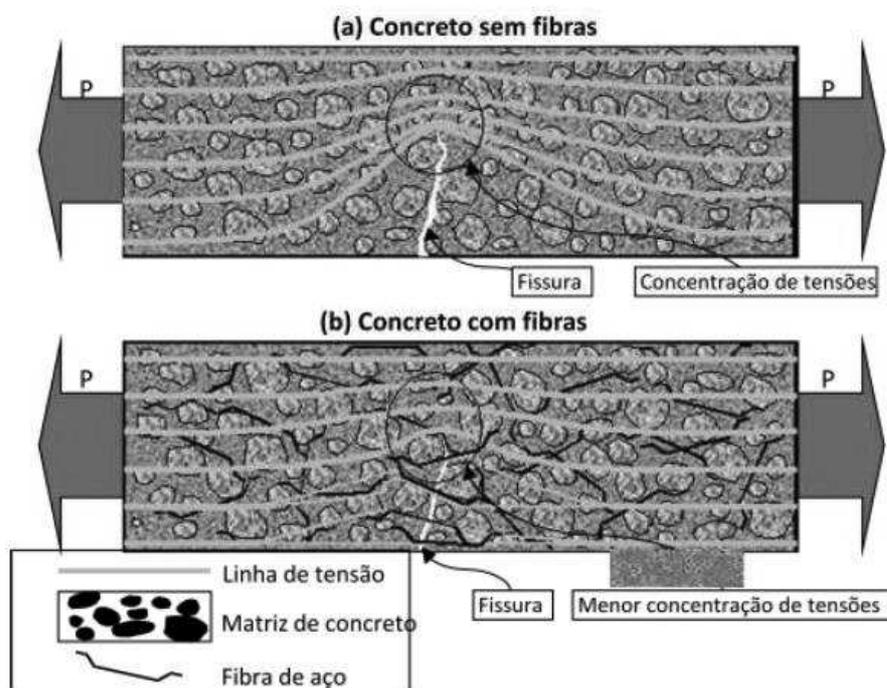


Figura 1 – Esquema de concentração de tensões para um concreto sem (a) e com reforço de fibras (b) (FIGUEIREDO, 2000).

Observa-se que a adição de fibras na mistura cimentícia resulta em uma significativa redução na velocidade de proliferação das fissuras no concreto e o material passa a ter um comportamento pseudo-dúctil (BRAZ e NASCIMENTO, 2015).

Com relação ao acréscimo de fibras, é possível afirmar que:

Se as fibras forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia, e em bastante quantidade, elas ajudarão a manter pequena a abertura das fissuras. Permitirão ao CRFA resistir a tensões de tração bem elevadas, com uma grande capacidade de deformação no estágio pós-fissuração (WATANABE, 2008).

Além do controle das fissuras no concreto, as fibras também desempenham papel fundamental no melhoramento de certas propriedades mecânicas. Segundo Johnston (1994), a inclusão de fibras na matriz cimentícia pode resultar em dois efeitos vantajosos muito importantes:

- Elas propendem a fortalecer o compósito contra todos os tipos de carregamentos induzidos à tração, isto é, retração restringida, tração direta ou na flexão e cisalhamento;
- A introdução de fibras de aço na matriz também influencia na melhora da ductilidade e tenacidade, resistência ao cisalhamento, à torção e à fadiga quando comparado ao concreto convencional.

2.2 Tipos de fibras

A utilização de compósitos com adição de fibras como materiais de construção possui registros com mais de 3000 anos, prova disso está em uma citação feita nas Sagradas Escrituras: “Naquele mesmo dia o Faraó deu esta ordem aos inspetores do povo e aos capatazes: não continueis a fornecer palha ao povo, como antes, para o fabrico dos tijolos” (Êxodo 5, 6-7). Mesmo há tanto tempo atrás, já se tinha conhecimento que a mistura de dois materiais distintos poderia melhorar as características do conjunto.

O emprego de fibras nas misturas cimentícias em setores da Construção Civil vem ocorrendo de forma gradativa e diversificada, como, por exemplo, pavimentos rígidos, pisos industriais, projetados, áreas de piscina, pré-moldados, argamassas, tanques e reservatórios, entre outros. Elas são fabricadas em diversos materiais, diâmetros e comprimentos, sendo aplicáveis em praticamente qualquer tipo de concreto e até mesmo combinadas, com o intuito de atender simultaneamente a diferentes finalidades, isto é, pode-se obter um reforço no concreto para altas temperaturas e um aumento do módulo de deformação ao mesmo tempo (ONUKE e GASPARETTO, 2013).

Nos dias atuais, os tipos de fibras que se encontra no mercado são: aço (Figura 2-a), polipropileno (Figura 2-b), vidro (Figura 2-c), nylon, poliéster, carbono (Figura 2-d), sintética, celulose, amianto, sisal e fibras vegetais.

As fibras podem ser classificadas como sintéticas e orgânicas (polipropileno e carbono), sintéticas e inorgânicas (aço ou vidro), naturais e orgânicas (celulose) ou naturais e inorgânicas (asbestos ou amianto) (ONUKE e GASPARETTO, 2013).

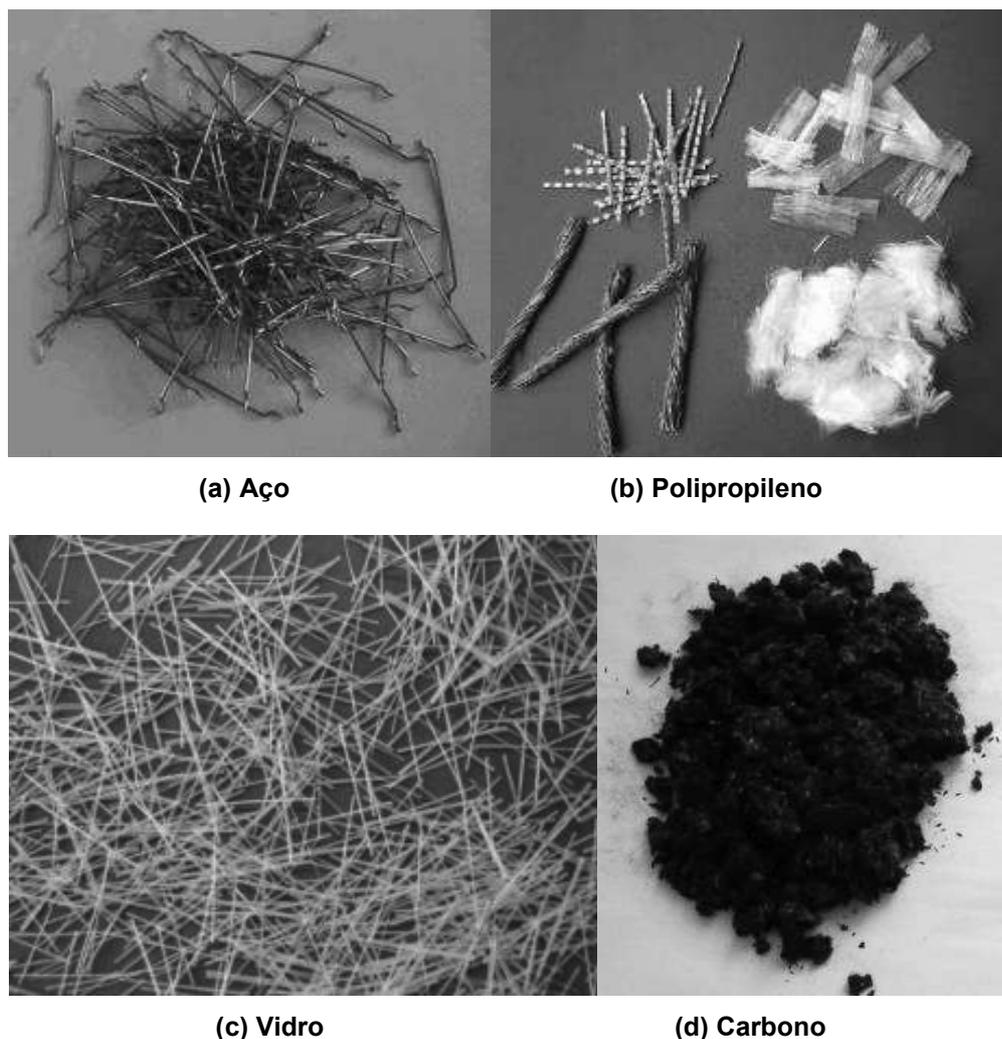


Figura 2 – Fibras para adição em concreto (ONUKEI; GASPARETTO, 2013).

Segundo Figueiredo (2005a), outra classificação que é feita para as fibras diz respeito às propriedades que são mais relevantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao concreto, são elas o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. As fibras que apresentam módulo de elasticidade inferior ao do concreto endurecido, como as de polipropileno e nylon, são designadas como fibras de baixo módulo, enquanto que as que possuem módulo de elasticidade superior ao do concreto são chamadas de fibras de alto módulo.

Em contraproposta, Figueiredo (2011) comenta que mesmo que uma fibra apresente elevado módulo de elasticidade, porém uma baixa resistência à tração ou ao cisalhamento, sua capacidade de reforço pós-fissuração ainda será praticamente nula, que é o caso de materiais frágeis de baixa capacidade de deformação elástica.

Visto isso, só são consideradas com capacidade de reforço das matrizes cimentícias aquelas fibras que apresentarem maior capacidade de deformação na ruptura e maior resistência à tração que a matriz de concreto, conforme ilustra a Tabela 1:

Tabela 1 – Valores de resistência mecânica e módulo de elasticidade para diversos tipos de fibra e matrizes

Material	Diâmetro (µm)	Densidade (g/cm ³)	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Deformação na ruptura (%)
Aço	5-500	7,84	190-210	0,5-2	0,5-3,5
Vidro	9-15	2,6	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	0,02-0,4	2,6	160-200	3-3,5	2-3
Polipropileno fibrilado	20-200	0,9	1-7,7	0,5-0,75	8,0
Kevlar	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono	9	1,9	230	2,6	1,0
Nylon	-	1,1	4,0	0,9	13-15
Celulose	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Acrílico	18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno	-	0,95	0,3	0,7x10 ⁽⁻³⁾	10
Fibra de madeira	-	1,5	71	0,9	-
Sisal	10-50	1-50	-	0,8	3,0
Matriz de cimento (para comparação)	-	2,50	10-45	3,7x10 ⁽⁻³⁾	0,02

Fonte: Bentur e Mindess (1990).

Verifica-se que as fibras de aço possuem alta resistência e alto módulo de elasticidade, podendo assim atuar como reforço no concreto endurecido e até mesmo substituir parte da armadura convencional em algumas situações (FIGUEIREDO, 2011). As fibras de carbono também poderiam ser utilizadas como reforço na matriz cimentícia, entretanto seu alto custo acaba atrapalhando tal aplicação. Além disso, as fibras de aço possuem outra grande vantagem que é o fato de já contar com norma de especificação no Brasil.

2.3 Classificação das fibras de aço

Com o intuito de garantir a qualidade das fibras de aço acompanhada à sua utilização cada vez mais abrangente em vários setores da construção civil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou em 2007 a primeira norma brasileira sobre fibras de aço, a NBR 15530 – Fibras de aço para concreto – Especificação (ABNT, 2007).

Nela são estabelecidos parâmetros para a classificação das fibras de aço com baixo teor de carbono e são dispostos os requisitos mínimos de forma geométrica, tolerâncias dimensionais, defeitos de fabricação, resistência à tração e dobramento, para que se tenha um produto com desempenho adequado de acordo à sua aplicação. Em tal norma, são previstos três tipos básicos de fibras em função de sua conformação geométrica: o Tipo A corresponde a fibras de aço com ancoragens nas extremidades; o Tipo C é referente a fibras de aço corrugadas; e Tipo R indica as fibras de aço retas.

A norma NBR 15530 (ABNT, 2007) ainda prescreve três tipos de classes para as fibras de aço segundo a origem das mesmas, são elas: a Classe I, referente às fibras oriundas de arames trefilados a frio; a Classe II, que indica as fibras vindas de chapas laminadas cortadas a frio; e a Classe III que corresponde às fibras originadas de arames trefilados e escarificados (GÓIS, 2010).

Figueiredo et al. (2008) explica que, além dessa divisão das fibras em grupos distintos possibilitar o estabelecimento de requisitos mínimos que possam ser correlacionados com o comportamento final do CRFA, procurou-se ainda abranger ao máximo a maioria das fibras de aço disponíveis no mercado nacional.

2.4 Desvantagens e vantagens do CRFA em relação ao concreto convencional

O CRFA é um produto que traz muitos benefícios e vantagens já comprovadas que induzem a sua utilização cada vez mais recorrente na construção civil. Entretanto, é um material que tem uma grande desvantagem que ainda o deixa limitado no uso em algumas situações, que é a grande redução na trabalhabilidade do compósito. Neste sentido, pode-se seguir a afirmação de que:

É bem conhecido que a adição de qualquer tipo de fibra em concreto convencional reduz a trabalhabilidade. Independente do tipo de fibra, a perda da trabalhabilidade é consideravelmente proporcional ao volume de concentração de fibras no concreto [...] Geralmente, o requisito de trabalhabilidade adequada de mistura contendo fibras pode ser alcançado com o uso de ar incorporado, aditivos plastificantes, maior quantidade de pasta de cimento (com ou sem pozolana), e uso de fibras coladas em conjunto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Braz e Nascimento (2015) comentam que essa significativa redução da trabalhabilidade é motivada pelo fator de forma e geometria da fibra, juntamente com a fração geométrica adicionada, o traço do concreto, granulometria dos agregados, em especial os grãos, e a aderência das fibras com a matriz. Quanto mais longas e mais acréscimo de fibras houver na mistura, maior será a diminuição da trabalhabilidade. Todavia, nos dias atuais, tal imperfeição pode ser corrigida com a utilização de modernos superplastificantes à base de acrílico.

O gradativo avanço que vem ocorrendo nos últimos anos nas pesquisas relacionadas às propriedades do CRFA, acompanhado ao estudo do comportamento estrutural do mesmo na prática, tende a aprimorar o desempenho deste material e proporcionar novas áreas de aplicação de forma otimizada e segura. Figueiredo (2000) argumenta que, para algumas aplicações, o CRFA apresenta vantagens tecnológicas e econômicas em relação ao convencional, como no revestimento de túneis, concreto projetado, pavimentos, pré-moldados, entre outros propósitos.

Existem obras muito bem sucedidas com o uso do CRFA que atestam os grandes benefícios que o concreto reforçado com fibras trás consigo quando comparado ao convencional:

O primeiro uso estrutural do concreto reforçado com fibras de aço foi em 1971 para a produção de painéis desmontáveis com dimensões 3250 m² por 65 mm de espessura para uma garagem de estacionamento do Aeroporto Heathrow de Londres. O concreto continha 3% em massa de fibra de aço formada a frio com 0,25 mm de diâmetro por 25 mm de comprimento. Na época da última inspeção relatada, depois de 5 anos de uso, as lajes não apresentaram sinais de fissuração [...] No Aeroporto McCarran International, em Las Vegas - Nevada, uma área existente de

estacionamento de aeronave pavimentada com asfalto (53.000 m²) foi revestida com concreto reforçado com fibras de aço de 150 mm de espessura, compara com a espessura de 380 mm que seria necessária para o concreto armado convencional (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No Brasil a utilização das fibras de aço no concreto vem progredindo cada vez mais com o decorrer dos anos. Pesquisa feita por Figueiredo (2011) com fabricantes e fornecedores aponta que as aplicações do CRFA são muito concentradas, tendo como principal ramo a utilização em pavimentos industriais, seguido do concreto projetado e dos pré-moldados. Um exemplo de construção civil no país que fez uso do CRFA para suporte é o Metrô subterrâneo – Linha Amarela – em São Paulo.

2.5 Transferência de tensões de cisalhamento em interfaces de concreto

Em um elemento cuja superfície esteja sujeita a esforços de cisalhamento, há uma tendência de deslizamento entre as partes de sua interface, ocasionando um movimento de translação. No caso em que a superfície da interface seja rugosa, além do movimento de translação, haverá ainda um afastamento das peças e uma transferência de tensões de cisalhamento, sendo que esta última se dará pela superfície de contato e pela armadura transversal à interface (JUDICE, 2002).

O sistema de transferência das reações pela superfície de contato é bem parecido com a transmissão dos esforços por tensões de aderência do aço para o concreto. Leonhardt et al. (1977, apud Judice, 2002) afirmaram que a ação da aderência desmembra-se em três partes: por adesão, atrito e mecânica.

A aderência por adesão decorre especialmente pela rugosidade e limpeza das partes, porém é um efeito de fácil destruição, podendo ser por até pequenos deslizamentos.

No caso da aderência por atrito entre as superfícies, que se dá imediatamente após o rompimento da adesão e somente quando se tem tensões transversais à interface, pode ser promovida pela atuação de esforços externos ou pela transmissão da armadura normal à superfície, quando solicitada à tração. A rugosidade da interface de contato é fator preponderante na resistência por atrito.

Por fim, existe a aderência por ação mecânica, que decorre do engrenamento mecânico entre as duas superfícies em contato que são solicitadas ao corte proveniente do deslizamento relativo entre as partes. Quando se tem faces rugosas, entra em ação o agregado graúdo como produto de garantia da ação mecânica, pois ele atravessa a interface de deslizamento e produz um mecanismo de engrenamento entre agregados. Utilizam-se ainda, em certas situações, “dentes de concreto” na interface com o intuito de melhorar a resistência da ligação.

O sistema de transmissão dos esforços pela armadura transversal à interface ou ação de pino é ativo quando ocorre translação na superfície de cisalhamento, na tentativa de a armadura deslizar, a mesma reage com uma força de compressão normal à interface. A resultante entre essa força e a resistência que a superfície de contato apresenta se converterá na capacidade resistente ao cisalhamento horizontal da ligação.

2.5.1 Modelos analíticos existentes para análise da resistência ao cisalhamento

2.5.1.1 Teoria atrito-cisalhamento

A chamada teoria atrito-cisalhamento foi desenvolvida por Birkeland e Birkeland (1966), com a finalidade de avaliar a resistência ao cisalhamento em interfaces de concreto atravessadas por armaduras.

A representação da referida teoria (Figura 6) é composta por um bloco de concreto monolítico, no qual se admite a existência de um plano fissurado $m-m$. O esforço cortante horizontal V tende a provocar um deslizamento entre as duas partes do bloco, que é resistido pelo atrito ($\mu \cdot P$), sendo que μ é o coeficiente de atrito e P é o esforço normal perpendicular ao plano de deslizamento (Figura 3-a). Como consequência do deslizamento, e considerando o plano $m-m$ como rugoso, haverá a separação das duas partes (Figura 3-b).

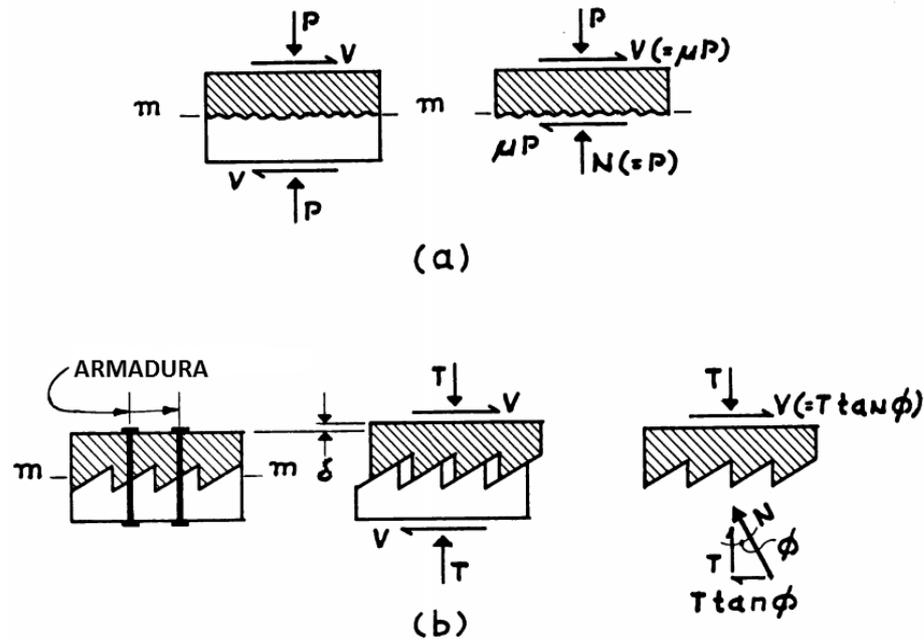


Figura 3 – Teoria atrito-cisalhamento: (a) força de atrito agindo entre duas superfícies em contato; (b) tração na armadura transversal devido às suas rugosidades e reação no concreto (Adaptado de BIRKELAND; BIRKELAND, 1966).

Esta separação pode ser evitada colocando-se a armadura em posição transversal à interface, o que acarretará no surgimento de esforços de tração T na armadura e esforços de compressão de mesma magnitude. A rugosidade da superfície possui uma inclinação de $\tan \phi$.

Comparando-se as Figuras 3-a e 3-b, é possível observar que $T \cdot \tan \phi$ equivale à força de atrito $\mu \cdot P$. Portanto, a força de tração T equivale à força normal P e a inclinação de $\tan \phi$ é equivalente ao coeficiente de atrito μ .

Diante disso, Birkeland e Birkeland (1966) desenvolveram uma das primeiras expressões para avaliar a resistência ao cisalhamento na interface (Equação 1).

$$V_u = T_u \cdot \tan \phi = A_{sw} \cdot f_y \cdot \tan \phi \quad (1)$$

Considerando A_c a área de contato, dividindo ambos os termos por este valor, obtém-se a tensão última de cisalhamento, que pode ser escrita como:

$$\tau_u = V_u / A_c = \rho_w \cdot f_y \cdot \tan \phi \leq 5,5 \text{ MPa} \quad (2)$$

Sendo:

A_{sw} → Área da armadura transversal;

- A_c → Área da interface de concreto;
 f_y → Tensão de escoamento da armadura transversal;
 V_u → Esforço cortante horizontal último;
 $\tan \phi = \mu$ → Coeficiente de atrito;
 ρ_w → Taxa geométrica da armadura transversal à interface;
 T_u → Força de tração última na armadura;
 τ_u → Tensão de cisalhamento última.

Devido ao número reduzido de ensaios, os autores recomendaram alguns limites para o concreto e a armadura utilizados, isto é, a Equação (2) aplica-se a concretos com resistência à compressão maior ou igual a 27 MPa e taxa de armadura transversal à interface menor ou igual à 1,5%, com diâmetro máximo de 19 mm e tensão de escoamento inferior a 414 MPa.

Este conceito pode ser utilizado em interfaces com superfícies lisas, superfícies artificialmente rugosas e superfícies ou conexões concreto-aço. De acordo com a preparação da superfície, o coeficiente de atrito definido pode ser:

- $\mu = 1,7$ para concreto monolítico;
 $\mu = 1,4$ para superfícies artificialmente rugosas;
 $\mu = 0,8$ a $1,0$ para superfícies lisas e conexões concreto-aço.

Todavia, depois de realizar ensaios relacionados ao tema, Mast (1968) apontou a necessidade de se considerar na transferência de cisalhamento a presença de fissuras, e sugeriu diferentes valores de coeficientes de atrito para a equação de Birkeland e Birkeland (1966):

- $\mu = 1,4$ para concreto-concreto, interfaces rugosas;
 $\mu = 1,0$ para concreto-aço, vigas compostas;
 $\mu = 0,7$ para concreto-aço, conectores soldados;
 $\mu = 0,7$ para concreto-concreto, interfaces lisas.

2.5.1.2 Critério de ruptura Mohr-Coulomb

Em 1773, Coulomb (apud Caputo, 1988) apresentou a Equação (3) para determinar a tensão última de cisalhamento em materiais granulares:

$$\tau_u = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (3)$$

Sendo:

$\tau_u \rightarrow$ Tensão de cisalhamento;

$\sigma \rightarrow$ Tensão normal ao plano de cisalhamento (compressão);

$c \rightarrow$ Coesão do material;

$\phi \rightarrow$ Ângulo de atrito interno.

No ano de 1900, Mohr (apud Caputo, 1988) generalizou esta expressão para todos os tipos de materiais, a fim de que a mesma representasse a envoltória de todos os círculos de Mohr traçados para diferentes estados de tensões principais que causam ruptura do material.

Conforme demonstra a Figura 4, a envoltória pode ser obtida a partir de uma reta que faz um ângulo ϕ com o eixo das tensões normais e tangencia o círculo de Mohr que representa a ruptura por compressão uniaxial. Considerando-se o círculo de Mohr que representa a ruptura por tração uniaxial, obtém-se a ruptura do material, que é representada pelo círculo tracejado.

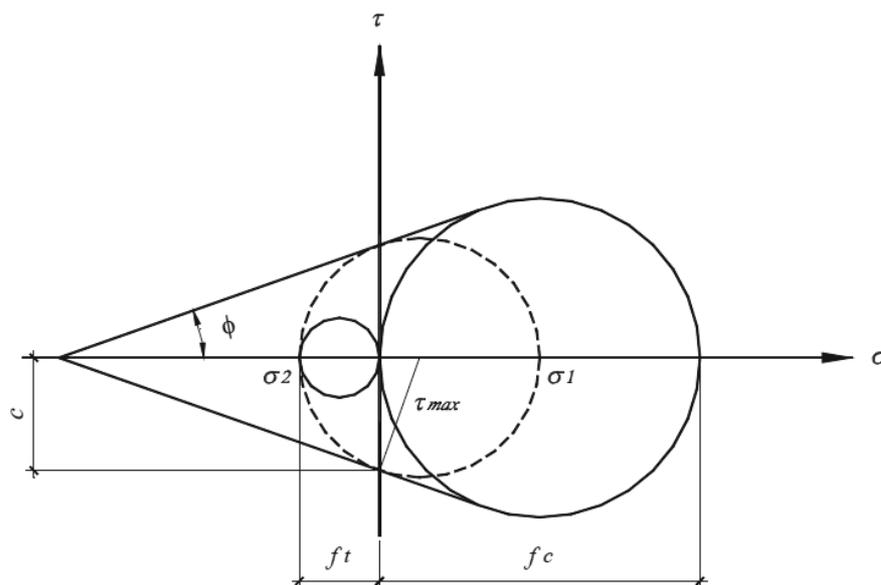


Figura 4 – Critério de ruptura Mohr-Coulomb, 1773 (apud JUDICE, 2002).

Pela figura acima, nota-se que:

$$\tau_{max} = (|\sigma_1| + |\sigma_2|)/2 \quad (4)$$

$$\tau = \tau_{max} \cdot \cos \phi \quad (5)$$

$$\sigma = (|\sigma_1| - |\sigma_2|)/2 - ((|\sigma_1| + |\sigma_2|)/2) \cdot \sin \phi \quad (6)$$

Portanto:

$$\tau = ((|\sigma_1| + |\sigma_2|)/2) \cdot \cos \phi = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (7)$$

Com a Equação (6) em (7), obtém-se:

$$|\sigma_1| \cdot ((1 - \sin \phi)/(2 \cdot c \cdot \cos \phi)) + |\sigma_2| \cdot ((1 + \sin \phi)/(2 \cdot c \cdot \cos \phi)) = 1 \quad (8)$$

Para concreto, quando $|\sigma_1|$ é igual a zero, a Equação (8) fornece a resistência à tração do concreto:

$$f_t = ((2 \cdot c \cdot \cos \phi)/(1 + \sin \phi)) \quad (9)$$

Por outro lado, quando $|\sigma_2|$ é igual a zero, tem-se a resistência à compressão do concreto:

$$f_c = ((2 \cdot c \cdot \cos \phi)/(1 - \sin \phi)) \quad (10)$$

Levando em consideração que o ângulo de atrito interno do concreto normalmente é igual a 37° , tem-se:

$$f_t \approx c \quad (11)$$

$$f_c \approx 4 \cdot c \quad (12)$$

Deste modo, a expressão que representa a resistência ao cisalhamento de um plano de ruptura de concreto rugoso aderente com armadura normal à interface é dada por:

$$\tau_u = c + (\rho_w f_y + \sigma_n) \cdot \tan 37^\circ \approx f_t + 0,75 \cdot (\rho_w f_y + \sigma_n) \quad (13)$$

Sendo:

$(\rho_w f_y + \sigma_n)$ → Tensão normal devida à armadura transversal à interface e à ação das forças aplicadas externamente.

Nas superfícies rugosas não aderentes, a parcela da coesão é nula e, portanto, a resistência ao cisalhamento é:

$$\tau_u = 0,75 \cdot (\rho_w f_y + \sigma_n) \quad (14)$$

2.5.2 Ensaio de cisalhamento direto

2.5.2.1 Ensaio realizado por Hofbeck et al.

Hofbeck et al. (1969) desenvolveram ensaios de cisalhamento direto, denominados *push-off* para determinar a influência da fissuração pré-existente, da armadura de costura e da resistência do concreto à compressão no mecanismo de transferência do cisalhamento. Ainda, analisaram a contribuição da ação de pino e a aplicação da teoria atrito-cisalhamento no cálculo da resistência com um plano pré-fissurado. A Figura 5 apresenta as características dos corpos de prova ensaiados.

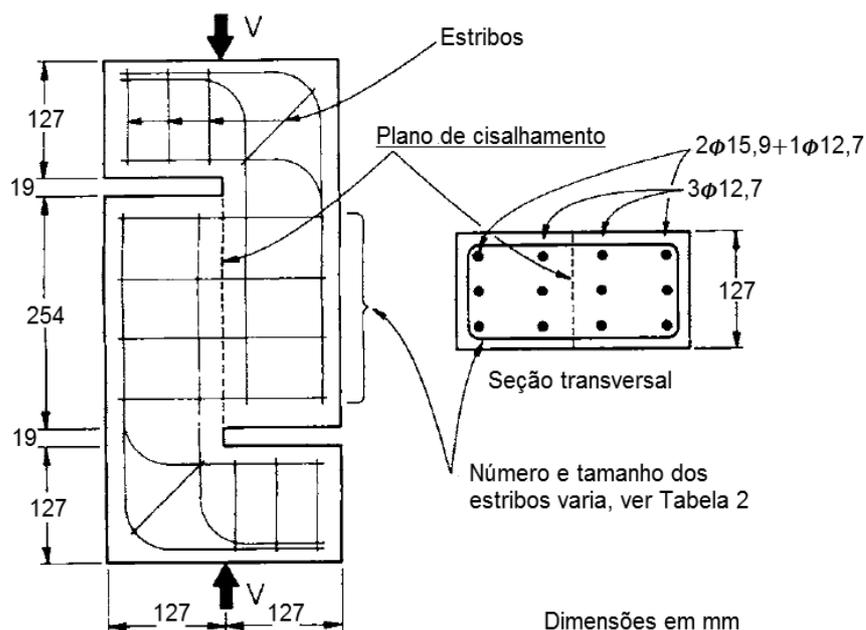


Figura 5 – Detalhes do espécime *push-off* (Adaptado de HOFBECK et al., 1969).

Foram ensaiadas seis séries distintas de peças de concreto, as quais se diferenciavam pelo diâmetro e quantidade de estribos. Além disso, os corpos de prova da Série 6 diferiram dos demais por apresentarem, na região do plano de cisalhamento, luvas de borracha com 50 mm de comprimento e 3,2 mm de espessura ao redor das pernas dos estribos. Essas luvas foram utilizadas para evitar o surgimento do efeito de pino.

Com exceção dos corpos de prova 6.1 e 6.2 e os da Série 1, todos os demais tiveram a formação de um plano de fissuração antes do início dos ensaios.

Nos resultados obtidos foram verificados comportamentos diferenciados entre as peças ensaiadas sem pré-fissuração e com pré-fissuração, conforme demonstrado na Figura 6. Nesta figura, Hofbeck et al. (1969) demonstram as curvas tensão última de cisalhamento (τ_u) vs. taxa de armadura transversal com tensão de escoamento do aço ($\rho_w f_y$) apresentados pelas peças da Série 1 e Série 2.

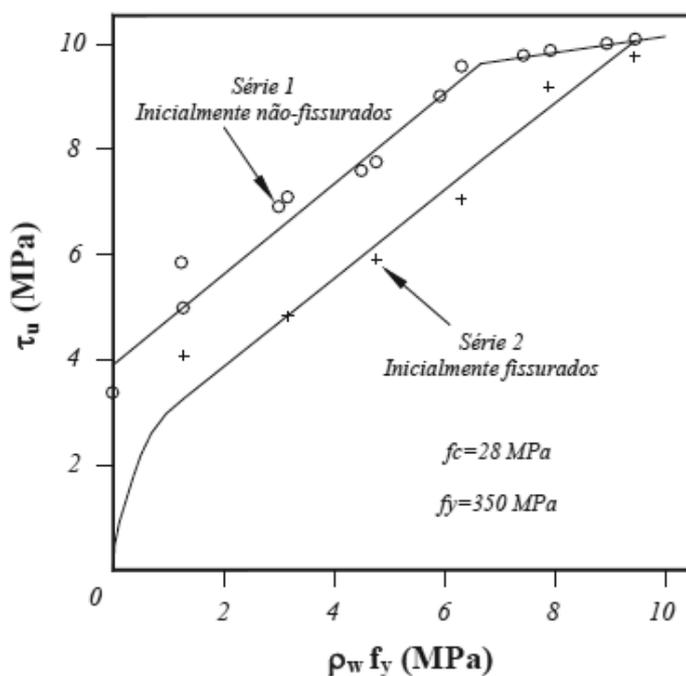


Figura 6 – Relação entre τ_u e $\rho_w f_y$ para os modelos inicialmente não fissurados e fissurados (Adaptado de HOFBECK et al., 1969).

A partir da figura acima, os autores observaram que as peças inicialmente pré-fissuradas apresentaram menores resistências ao cisalhamento quando comparadas com as peças não fissuradas. Além disso, viram que a resistência ao cisalhamento das peças pré-fissuradas não era diretamente proporcional à taxa de

armadura transversal. Para valores de $\rho_w f_y$ superiores a 1,4 MPa, a tendência da curva revela que a resistência ao cisalhamento contou com alguma contribuição do concreto, mesmo com a existência de um plano previamente fissurado.

2.5.2.2 Ensaio realizado por Mattock et al.

Em continuidade ao trabalho de Hofbeck et al. (1969), Mattock et al. (1972) avaliaram a influência das tensões normais e paralelas ao plano de cisalhamento no mecanismo de transferência do cisalhamento em peças de concreto submetidas a cisalhamento direto, com corpos de prova do Tipo B, ensaios de *pull-off*, e do Tipo C, ensaios de *push-off* modificado, conforme ilustrado na Figura 7.

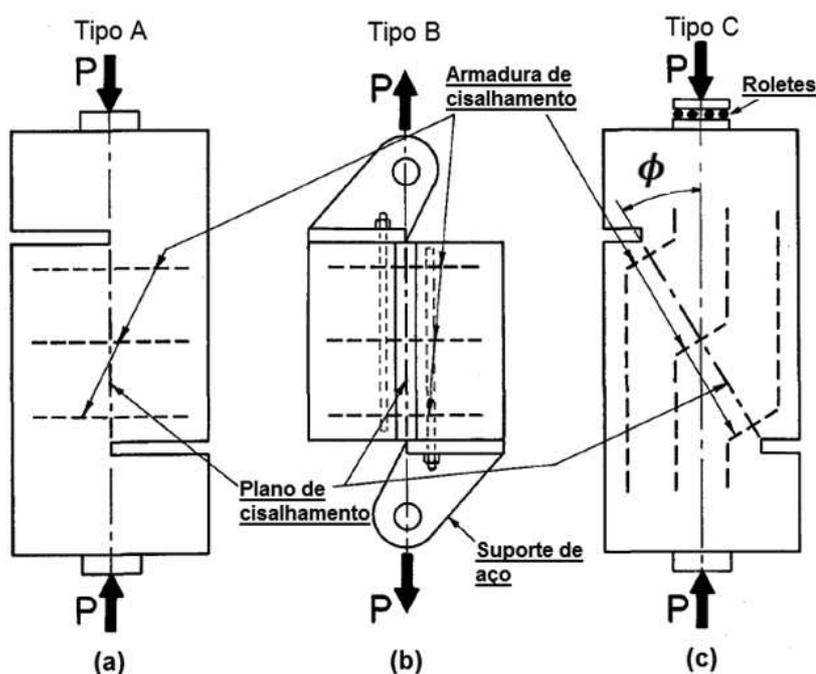


Figura 7 – Espécimes de teste de transferência de cisalhamento: (a) *push-off*; (b) *pull-off*; (c) *push-off* modificado (Adaptado de MATTOCK et al., 1972).

Como sequência aos ensaios realizados por Hofbeck et al. (1969), Mattock et al. (1972) confeccionaram mais quatro séries de peças de concreto, sendo que as séries 7 (peças inicialmente não-fissuradas) e 8 (peças inicialmente fissuradas) referem-se às peças do tipo B, enquanto que as séries 9 (peças inicialmente não-fissuradas) e 10 (peças inicialmente fissuradas) referem-se às peças do tipo C.

A Figura 8 ilustra as tensões de cisalhamento últimas das peças de concreto ensaiadas em *push-off* e *pull-off*. Nela pode-se observar que, para as peças inicialmente não-fissuradas, os ensaios de *pull-off* indicaram valores inferiores para τ_u , isto se deve a tensão de tração paralela ao plano de cisalhamento ser prejudicial ao mecanismo de transferência do cortante nesses elementos.

Já quando se considera a taxa de crescimento de τ_u com o incremento de $\rho_w \cdot f_y$, nota-se pela figura que os resultados são aproximadamente os mesmos em ambos os tipos de ensaios. O mesmo ocorre nas peças inicialmente pré-fissuradas quando comparadas entre si.

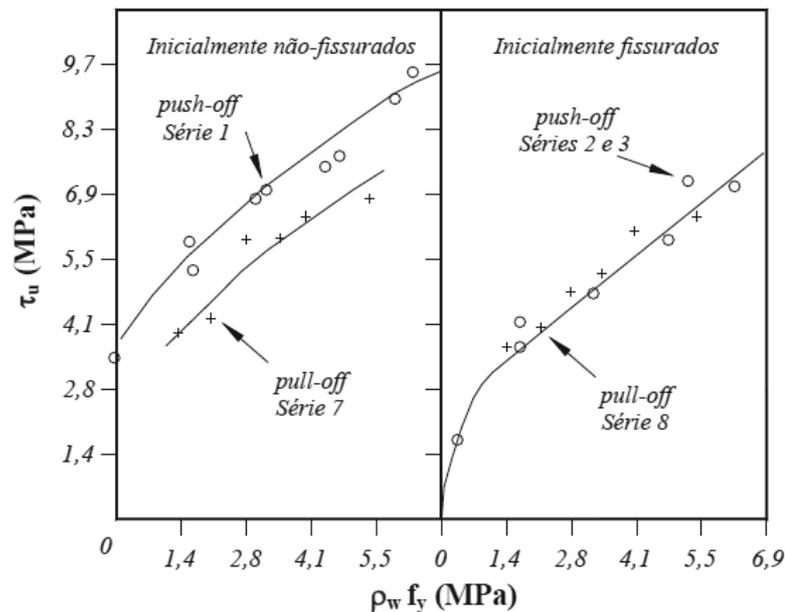


Figura 8 – Efeito da tensão direta paralela ao plano de fissuração sobre τ_u (Adaptado de MATTOCK et al., 1972).

Por meio de diversas análises, Mattock et al. (1972) sugerem a seguinte expressão para determinação da resistência ao cisalhamento em elementos pré-fissurados:

$$\tau_u = 1,4 + 0,8 \cdot (\rho_w f_y + \sigma_n) \leq 0,3 \cdot f_c \quad (15)$$

Sendo:

$$(\rho_w f_y + \sigma_n) \geq 1,4 \text{ MPa}$$

Na Figura 9 são comparados os resultados experimentais dos corpos de prova inicialmente fissurados com a equação proposta por Mattock et al. Pode-se constatar que a Equação (15) é o limite inferior dos valores experimentais.

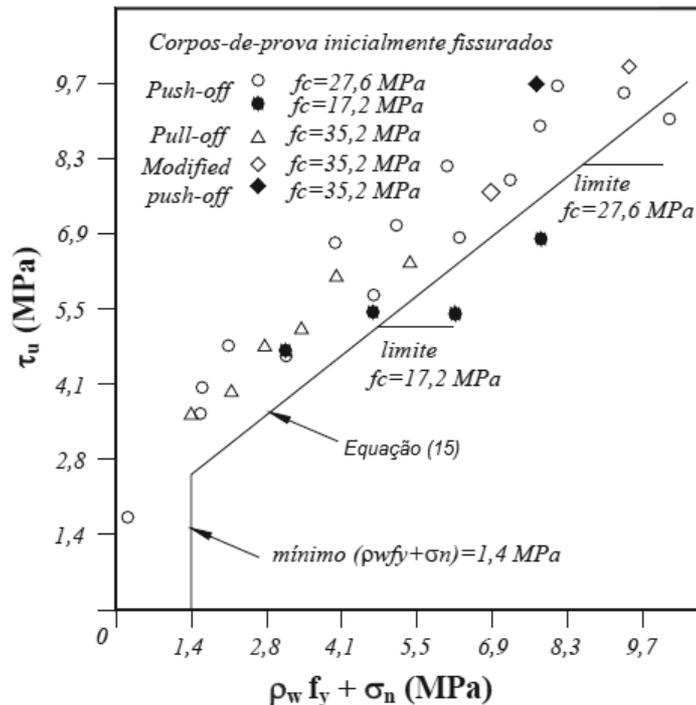


Figura 9 – Comparação dos valores de τ_u experimentais com os estimados pela Equação (15) (Adaptado de MATTOCK et al., 1972).

A última calibração que foi feita por Mattock et al. (1975) na Equação (15), fundamentada em mais uma extensa série de ensaios, propõe a Equação (16).

$$\tau_u = 2,8 + 0,85 \cdot (\rho_w f_y + \sigma_n) \leq 0,3 \cdot f_c \quad (16)$$

Sendo:

$$(\rho_w f_y + \sigma_n) \geq 1,4 \text{ MPa}$$

2.5.3 Métodos de determinação da resistência ao cisalhamento

Entre os métodos de ensaio existentes para quantificar a resistência ao cisalhamento de peças de concreto destacam-se os ensaios de *push-off* (Figura 10-a), o método padrão da Sociedade Japonesa de Engenharia Civil (JSCE-G 553,

1999) (Figura 10-b) e o processo FIP (Federação Internacional de Protensão, 1978) (Figura 10-c).

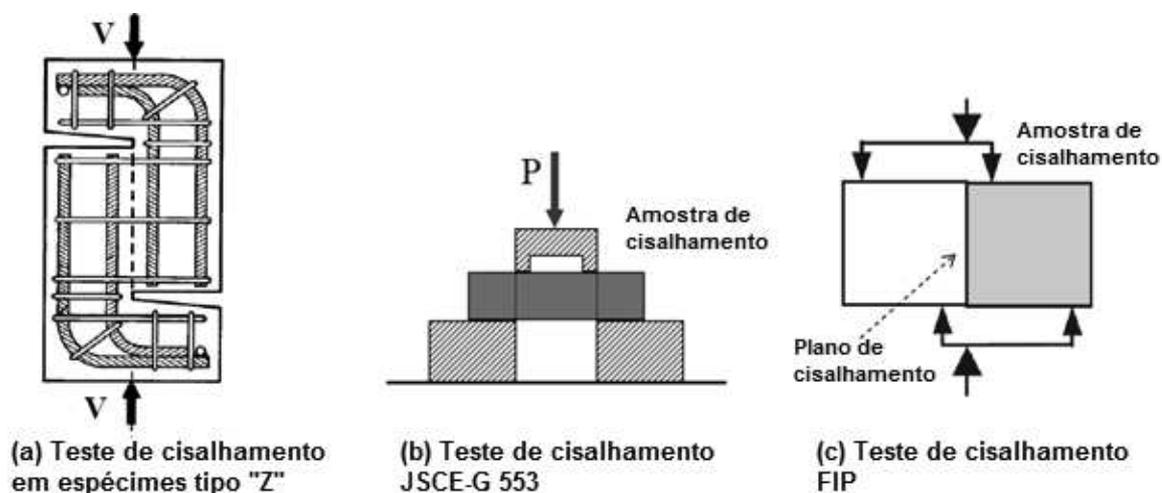


Figura 10 – Modelos de ensaios para determinação da resistência ao cisalhamento direto (Adaptado de KHANLOU et al., 2013).

O ensaio do tipo *push-off*, que utiliza corpos de prova em formato Z ou forma de L duplo, tem sido muito usado tanto para concreto convencional como para CRFA, porém não é um procedimento padronizado e, assim, costuma-se variar as dimensões das peças de concreto. Por exemplo, Hoffbeck et al. (1969) utilizaram exemplares com dimensões de 546 mm x 254 mm x 127 mm, Walraven e Reinhardt (1981) usaram peças de 600 mm de altura e uma secção transversal de 300 mm por 120 mm e Khaloo e Kim (1997) utilizaram amostras de 520 mm x 300 mm x 125 mm.

Mirsayah e Banthia (2002) identificaram que nos ensaios feitos por Hoffbeck et al. (1969), onde faziam uso de amostras em forma de L duplo, as condições de tensão e fissuração desviaram-se significativamente de estarem em cisalhamento puro, perdendo de tal forma a confiabilidade nos resultados obtidos. Para utilização em concretos com fibras, Barragan et al. (2006) identificaram que o uso de sulcos laterais juntamente com as barras de reforço dentro das peças, como no ensaio de *push-off*, causam uma grande interferência na distribuição das fibras na mistura. Ademais, se houver a necessidade de um grande número de testes, a preparação dos exemplares torna-se um processo bastante trabalhoso e pesado.

Khanlou et al. (2013) fez uso do teste de cisalhamento FIP (1978) em peças de concreto com dimensões de 250 mm x 250 mm x 540 mm, sendo que neste

método de ensaio a interface é teoricamente submetida a forças de cisalhamento puro, minimizando a ocorrência de um momento de flexão devido a excentricidades de força.

Araújo et al. (2014) utilizou o procedimento da norma G 553 (JSCE, 1999), que é uma versão modificada do método SF6 (JSCE, 1990), para determinar as tensões de cisalhamento de seus corpos de prova de concreto com dimensões de 150 mm x 150 mm x 600 mm, aos quais foi aplicada uma carga na peça central e, com a existência de um vão na base inferior, originou-se dois planos de cisalhamento, um em cada extremo do vão.

Com isso, é possível observar que a confecção e o formato dos espécimes são parecidos nesses dois métodos citados acima, isto é, ambos fazem uso de peças prismáticas e apenas utilizam as fibras de aço na mistura, diferentemente dos espécimes tipo Z que utilizam ainda barras de aço em suas composições.

A principal diferença entre os dois procedimentos está na forma de determinação das tensões de cisalhamento das peças ensaiadas. Enquanto no processo padrão FIP (1978) existe apenas um plano de corte, no método padrão da G 553 (JSCE, 1999) existem dois planos de corte.

2.5.4 Estudos experimentais realizados com CRFA

2.5.4.1 Ensaio realizados por Mirsayah e Banthia

Mirsayah e Banthia (2002) ensaiaram corpos de prova com fibras de aço utilizando o método de ensaio JSCE-SF6 (1990), com o intuito de quantificar a resistência ao cisalhamento do CRFA. O traço de concreto em massa que foi utilizado para a produção das peças era 1: 2,89: 2,22 (cimento: brita: areia), com relação água/cimento igual a 0,49, sendo empregados na mistura o Cimento Portland Tipo I, dois tipos de agregados graúdos com dimensão máxima característica (DMC) de 9,5 mm e 19 mm, areia de rio e água.

Dois tipos de fibras de aço foram utilizadas, uma fibra ondulada de 50 mm com uma seção transversal crescente (CR) e uma fibra com extremidade achatada e seção transversal circular de diâmetro 50 mm (FE). A geometria e as propriedades dessas duas fibras são dadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades das fibras investigadas

Fibra	Comprimento, mm	Diâmetro, mm	Seção	Resistência à Tração, MPa	Massa/Fibra, g
Extremidade achatada (FE)	50	1	Circular	1150	0,3079
Ondulada (CR)	50	1 (diâmetro equivalente)	Crescente	828	0,4566

Fonte: Adaptado de Mirsayah e Banthia (2002).

Os detalhes das amostras encontram-se na Tabela 3. Para as fibras FE, ocorreu uma fraca dispersão na mistura para frações volumétricas acima de 1,5%, e devido a isso, tornou-se a dosagem máxima a ser estudada para essa fibra. Já no caso das fibras CR, a dispersão no conteúdo foi satisfatória até o percentual volumétrico de 2,0%, podendo assim ser incluídas no programa de ensaio.

Tabela 3 – Detalhes dos espécimes

Designação dos Espécimes	Dosagem das Fibras, kg/m ³	Fração Volumétrica, % (aproximadamente)
Controle	0	0,00
FE20	20	0,25
FE40	40	0,50
FE60	60	0,75
FE80	80	1,00
FE120	120	1,50
CR20	20	0,25
CR40	40	0,50
CR80	80	1,00
CR120	120	1,50
CR160	160	2,00

Fonte: Mirsayah e Banthia (2002).

Para as misturas com frações de volume de fibras superiores a 1% foi utilizado um aditivo redutor de água (ASTM 494, Tipo A), objetivando uma melhora na trabalhabilidade e uma dispersão mais adequada das fibras no conjunto.

Para cada mistura, foram moldados três corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro x 200 mm de comprimento para determinação da resistência à

compressão, e seis prismáticos de 150 x 150 x 500 mm para o ensaio de cisalhamento direto, seguindo a norma SF6 (JSCE, 1990). Ainda foram feitas outras quatro peças de CRFA com dimensões de 100 x 100 x 350 mm e acréscimo de fração volumétrica de 0,5% da fibra de extremidade achatada (FE), com o objetivo de determinar as propriedades na flexão da tenacidade, de acordo com a ASTM C 1018-97 (2001).

Após a fundição, as peças foram cobertas por folhas de polietileno por 24 horas, depois colocadas em cura saturada com temperatura controlada e, por fim, foram ensaiadas após oito semanas.

Inicialmente os corpos de prova prismáticos foram ensaiados sem redução do plano de cisalhamento, resultando em ruptura fora do local exigido pelo tipo de ensaio. Para resolver o problema, os planos de cisalhamento foram induzidos através de cortes com 15 mm de profundidade em todas as faces.

A carga foi aplicada continuamente e com uma razão de tensão de cisalhamento de 0,06 a 0,1 MPa por segundo, e o deslocamento foi medido pela média dos sinais de dois transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) ligados às superfícies superior e inferior da amostra.

A Tabela 4 apresenta os resultados médios obtidos com a realização dos experimentos feitos pelos autores para cada grupo de espécimes.

Tabela 4 – Detalhes dos espécimes

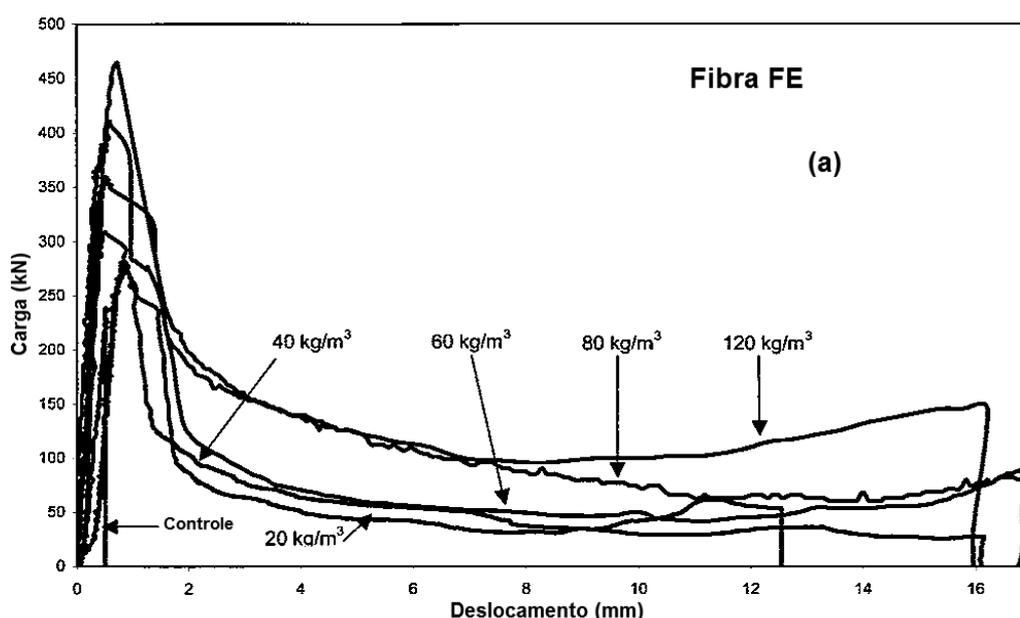
Espécimes	Carga Máxima de Cisalhamento, kN	τ_{max}, MPa	Aumento de τ_{max}, %
Controle	257,80	7,61	0,0
FE20	296,00	9,10	19,5
FE40	317,90	9,81	28,8
FE60	349,20	10,78	41,6
FE80	382,80	11,80	55,0
FE120	453,64	14,31	88,0
CR20	230,00	7,10	-
CR40	316,90	10,05	31,9
CR80	342,24	11,17	46,7
CR120	365,38	11,55	51,7
CR160	357,42	11,80	55,0

Fonte: Adaptado de Mirsayah e Banthia (2002).

Os resultados demonstraram que o acréscimo de fibras de aço na mistura aumentou a tensão última cisalhante. Além disso, é possível observar que a fibra FE apresentou quase todos os valores de tensões últimas cisalhantes maiores que os obtidos pela fibra CR quando se comparam as frações volumétricas, apenas o percentual de 0,5% tornou-se falho.

Esse desempenho superior da fibra FE sobre a fibra CR é atribuído, segundo os autores, ao fato de que a fibra CR é mais pesada e possui menor resistência à tração que a fibra FE. No caso do peso, quanto maior for, maior também será o número de fibras se cruzando no conteúdo, e, para a intensidade, quanto menor for, maior será a possibilidade de uma falha de corte prematura através de uma fenda.

Nas Figuras 11-a e 11-b encontram-se as curvas típicas, para valores médios, de deslocamento vs. carga cisalhante aplicada para o concreto simples e para o CRFA com diferentes taxas de dosagem das duas fibras. O que se pode tirar a mais de informações nessas imagens, isto é, além do que já foi citado sobre a Tabela 6, é o fato de não haver necessariamente uma ordem linear entre o aumento da fração volumétrica de fibras na mistura com valores maiores de deslocamentos, mas pode-se dizer que as fibras contribuíram com maiores deslocamentos ao CRFA em relação ao concreto convencional e, ainda, mostra que as fibras FE contribuíram também com maiores deslocamentos ao CRFA em relação às fibras CR.



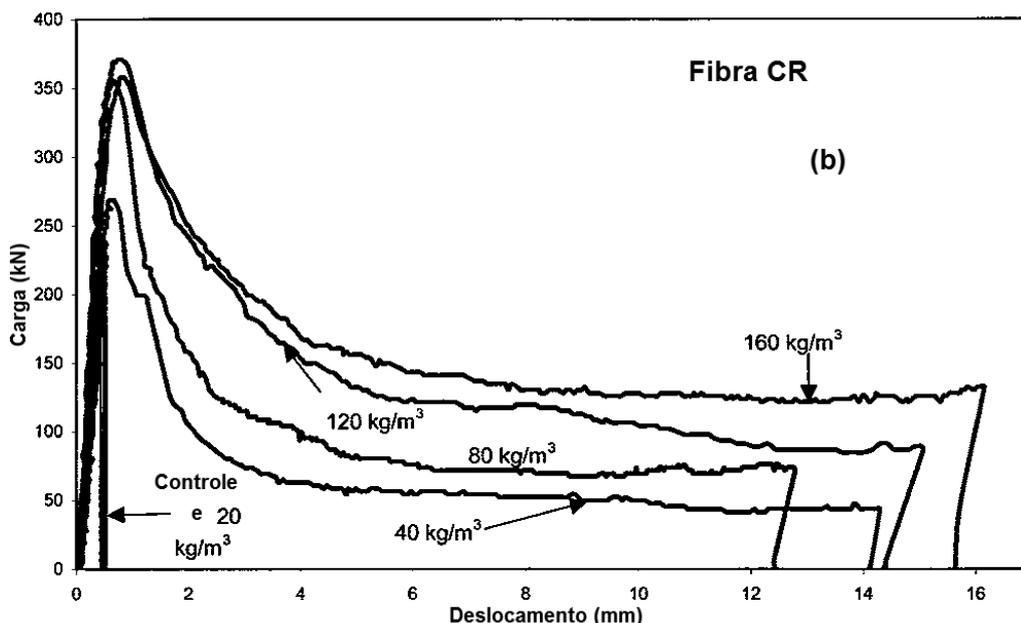


Figura 11 – (a) Curvas de carga-deslocamento representativas para feixes CRFA com fibras FE; e (b) com fibras CR (Adaptado de MIRSAYAH; BANTHIA, 2002).

A Figura 12 representa a relação entre a resistência última cisalhante com a fração de volume das fibras FE e CR. Nela se observa que a fibra FE obteve resposta superior à fibra CR. A curva da fibra FE é quase linear, enquanto que a fibra CR apresenta uma curva inicialmente linear seguida por um patamar em que se atingem valores de resistência ao cisalhamento quase constantes. Para obtenção das equações para cada tipo de fibra, os autores fizeram uma análise de regressão, obtendo a expressão:

$$\tau_{max} = \tau_0 + K \cdot V_f^n \quad (17)$$

Sendo:

τ_0 → Resistência ao cisalhamento do concreto simples;

V_f → Fração de volume de fibras em %;

K e n → São variáveis que estão em função da geometria da fibra.

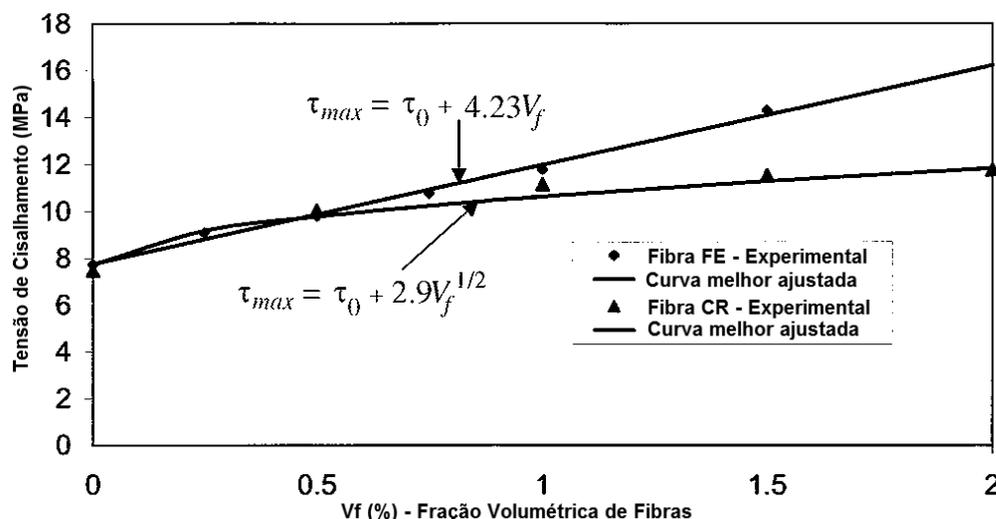


Figura 12 – Resistência ao cisalhamento em função da fração volumétrica das fibras FE e CR (Adaptado de MIRSAYAH; BANTHIA, 2002).

No ensaio realizado pelos autores, a resistência ao cisalhamento do concreto simples apresentou valor igual a 7,50 MPa. No entanto, o valor de τ_0 é dependente das proporções de mistura do concreto e, indiretamente, da resistência à compressão.

2.5.4.2 Ensaios realizados por Malatesta e Contreras

Malatesta e Contreras (2009) realizaram testes de cisalhamento utilizando o método de ensaio SF6 (JSCE, 1990) modificado por Mirsayah e Banthia (2002), para avaliar o efeito do conteúdo e a relação “aspecto de fibras” na tenacidade do CRFA sob condições de cisalhamento.

Misturas de concreto reforçado com fibras de aço de diferentes proporções ($l/d = 65$ e 80) e diferentes dosagens ($V_f = 0,5\%$ e $1,0\%$) foram confeccionadas e ensaiadas. As características e proporções dos materiais constituintes para a produção do CRFA estão demonstradas na Tabela 9. O traço de concreto em massa que foi utilizado era 1: 2,70: 2,20 (cimento: brita: areia), com relação água/cimento igual a 0,57, sendo empregados na mistura o cimento nacional, classificado de acordo com a NCh 148 como cimento pozolânico, agregados miúdos (DMC = 0-5 mm) e grãos (DMC = 5-20 mm) extraídos do rio chileno Aconcagua e água potável.

As fibras que foram estudadas são de extremidades duplas da marca Dramix e dos tipos RC-65/35-BN e RC-80/60-BN, cujas propriedades se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades das fibras de aço

Fibra	Comprimento, l , mm	Diâmetro, d , mm	Resistência à Tração, MPa	Relação de Aspecto, l/d
RC-65/35-BN	35	0,55	1100	65
RC-80/60-BN	60	0,75	1050	80

Fonte: Belgo Bekaert (2017).

Na Tabela 6, onde são demonstradas as designações que as peças recebiam de acordo o percentual de acréscimo de fibras, HN representa a matriz de concreto sem acréscimo de fibras e os concretos reforçados com fibras seguem a anotação: HRF-X,X-YY, onde X,X indica o percentual volumétrico de fibras e YY indica o aspecto l/d .

Tabela 6 – Detalhes dos concretos estudados

Material	HN	HRF-0,5-65	HRF-1,0-65	HRF-0,5-80	HRF-1,0-80
Dosagem das Fibras, kg/m ³	0	40	80	40	80
Volume de Fibras, V_f , %	0	0,5	1	0,5	1

Fonte: Adaptado de Malatesta e Contreras (2009).

Espécimes prismáticos de 100 mm x 100 mm x 500 mm, 5 para cada concreto estudado, foram moldados para o ensaio de cisalhamento direto e, também, peças cilíndricas com dimensões de 150 mm de diâmetro x 300 mm de altura foram moldadas para a determinação da resistência à compressão.

Após 24 horas, foram desmoldados e colocados em cura saturada com temperatura controlada até a data do teste. Com a idade de 7 dias, foram feitas serragens nas amostras de cisalhamento com entalhes de 10 mm de profundidade (equivalente a $D/10$, sendo D a altura do espécime), conforme o que foi seguido nos

ensaios realizados por Mirsayah e Banthia (2002). A disposição das peças de concreto no aparelho que realizou os testes de cisalhamento seguiu os critérios que o método de ensaio SF6 (JSCE, 1990) exige em função das dimensões dos corpos de prova.

Em cada teste de cisalhamento, foram registradas as forças cisalhantes e os deslocamentos ao longo da aplicação da carga P no bloco central de cada amostra. A variável deslocamento foi medida com um LVDT de 20 mm de alcance, localizado no centro da amostra, enquanto que a variável carga cisalhante foi medida diretamente na célula de carga da máquina que realizou os testes.

Na Tabela 7 estão os valores médios obtidos de tensão última cisalhante das peças de concreto ensaiadas pelos autores para cada fração volumétrica de acréscimo de fibras:

Tabela 7 – Resistência ao cisalhamento dos concretos em estudo

Concreto	HN	HRF-0,5-65	HRF-0,5-80	HRF-1,0-65	HRF-1,0-80
τ_{max} , MPa	3,97	6,97	8,75	8,01	7,10
Aumento de τ_{max}, %	0,0	75,6	120,4	101,8	78,8

Fonte: Adaptado de Malatesta e Contreras (2009).

Por estes resultados apresentados na tabela acima, vê-se que a adição de fibras na mistura contribuiu no aumento da resistência ao cisalhamento máxima em relação ao concreto simples. Porém, não existiu linearidade entre os valores obtidos de tensão última cisalhante nos dois tipos de fibras em relação ao aumento de suas proporções nas misturas e nem mesmo quando comparadas entre si, isto é, apenas no caso da fibra de tipo RC-65/35-BN pode-se observar que existiu um aumento na resistência de acordo ao aumento de sua fração volumétrica no conteúdo.

Observações feitas pelos autores em relação às Figuras 13-a e 13-b dizem que as curvas das peças de CRFA, durante os testes, demonstraram uma transição suave entre a pré e pós-fissuração, não havendo uma queda abrupta na carga, diferentemente das peças sem acréscimo de fibras. Para o intervalo pós-fissuração, as amostras apresentaram uma região de amolecimento seguida por uma cauda que é fortemente influenciada pelo tipo e quantidade de fibras contida no concreto.

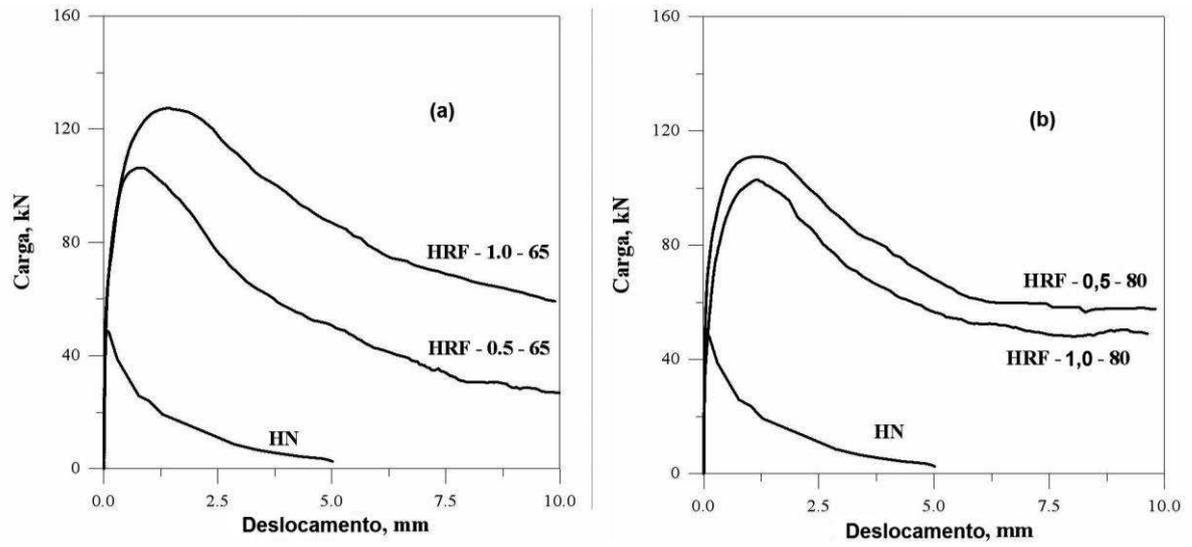


Figura 13 – Curvas médias de deslocamento vs. carga de corte aplicada para os concretos estudados (Adaptado de MALATESTA; CONTRERAS, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico estão especificados os materiais e a metodologia que foram empregados no estudo experimental realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Toledo, e também da Universidade Paranaense (UNIPAR), *campus* Toledo, com o intuito de avaliar a resistência ao cisalhamento de peças de concreto produzidas com diferentes frações volumétricas de fibras de aço.

3.1 Materiais empregados

O traço de concreto, em volume, que foi utilizado para a confecção das peças é 1: 1,87: 1,43 (cimento:brita:areia), com relação água/cimento igual a 0,58, traço este utilizado por Malatesta e Contreras (2009) que apresentou resistência à compressão próximo a 35 MPa. Na Tabela 8 estão apresentadas as quantidades de cada material que foram necessárias para produção de 1 m³ de concreto:

Tabela 8 – Quantidade de materiais para produção de 1 m³ de concreto.

Material	Cimento	Brita (DMC = 19 mm)	Brita (DMC = 9,5 mm)	Areia	Água
Quantidade (kg/m³)	372,10	341,59	663,08	818,62	212,10

Para a produção do concreto, foi utilizado Cimento Portland CP V de Alta Resistência Inicial (ARI), areia natural extraída do Rio Paraná e agregado graúdo de origem basáltica com dimensão máxima característica (DMC) igual a 9,5 mm (66% da massa total utilizada em brita na mistura) e 19 mm (34% restante da massa total utilizada em brita na mistura). No presente estudo, foi necessário fazer um ajuste na trabalhabilidade em algumas das concretagens, sendo utilizado o aditivo superplastificante Tec-Flow 8000 da marca GRACE, cujas características estão demonstradas na Tabela 9.

Tabela 9 – Principais características do aditivo que foi utilizado no concreto a ser produzido

Produto	Descrição do Produto	Aspecto/Cor	Dosagem Recomendada (% SPC)	Massa Específica g/cm ³ (NBR 10908)
Tec-Flow 8000	Aditivo a base de policarboxilato de sódio	Líquido alaranjado	0,3 a 2,0%	1,080 - 1,120

Fonte: Grace (2017).

A caracterização dos agregados consistiu na determinação da distribuição granulométrica, teor de material pulverulento, massa específica e massa específica unitária, de acordo com as normas NBR NM 248 (ABNT, 2003), NBR 7211 (ABNT, 2009), NBR NM 46 (ABNT, 2003), NBR NM 52 (ABNT, 2009), NBR NM 53 (ABNT, 2009) e NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Utilizando o traço de concreto convencional foram desenvolvidas outras duas misturas, com acréscimo de frações volumétricas de fibras de aço de 0,5% em uma mistura e 1,0% na outra, frações estas correspondentes ao volume de concreto. As misturas de concreto foram representadas pela letra C seguida de um número correspondente à massa de fibras adicionadas por metro cúbico de concreto, iguais a 0 kg/m³, 40 kg/m³ e 80 kg/m³, correspondentes às frações de 0%, 0,5% e 1,0%, respectivamente.

As fibras de aço que foram utilizadas na mistura de concreto são de extremidades duplas e da marca Belgo Bekaert, modelo DRAMIX 3D, tipo RC-80/60-BN, cujas propriedades estão demonstradas na Tabela 10. Vale lembrar que essas fibras de aço foram as mesmas utilizadas em parte do estudo feito por Malatesta e Contreras (2009), juntamente com as dosagens de 0,5% e 1,0% de acréscimo de fibras na mistura cimentícia.

Tabela 10 – Propriedades da fibra de aço que foi utilizada

Fibra	Comprimento, <i>l</i> (mm)	Diâmetro, <i>d</i> (mm)	Resistência à Tração (MPa)	Fator de Forma
RC-80/60-BN	60	0,75	1225	80

Fonte: Belgo Bekaert (2017).

3.2 Produção do concreto

Para produção do concreto foi utilizada uma betoneira com volume de cuba de 220 litros. No estado fresco os concretos foram caracterizados com ensaios de determinação da trabalhabilidade, conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), e no estado endurecido foram determinadas a resistência à compressão, conforme norma NBR 5739 (ABNT, 2007) e resistência à tração por compressão diametral, conforme norma NBR 7222 (ABNT, 2011). Para isto, foram moldados dezoito corpos de prova cilíndricos com diâmetro igual a 100 mm e 200 mm de altura, sendo nove para o ensaio de resistência a compressão e nove para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, com três peças para cada fração de adição de fibras de aço.

Para a produção de todos os corpos de prova foram necessários aproximadamente 240 litros de concreto, divididos em três concretagens, uma para cada teor de adição de fibras. Na Tabela 11 estão apresentadas as quantidades dos insumos que foram utilizados para a produção das peças de concreto em cada betonada:

Tabela 11 – Quantidades de materiais utilizados para produção de 80 litros de concreto.

Insumo	Unidade	C0	C40	C80
Cimento	Kg	29,77	29,77	29,77
Água	Kg	16,97	16,97	16,97
Areia	Kg	65,49	65,49	65,49
Brita (DMC = 9,5 mm)	Kg	53,05	53,05	53,05
Brita (DMC = 19 mm)	Kg	27,33	27,33	27,33
Fibra	Kg	0,00	3,20	6,40

O aditivo superplastificante foi dosado durante a produção do concreto, visando ajustar a trabalhabilidade do concreto para um abatimento de ± 100 mm seguindo as prescrições da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

3.3 Características dos corpos de prova para o ensaio de cisalhamento direto

Para a realização do ensaio de cisalhamento direto foram confeccionadas peças de concreto prismáticas com as mesmas dimensões adotadas no estudo feito por Mirsayah e Banthia (2002), sendo iguais a $500 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$, conforme apresentado na Figura 14. Foram produzidos seis corpos de prova para cada fração volumétrica de adição de fibras de aço (0%, 0,5% e 1,0%), totalizando 18 exemplares.

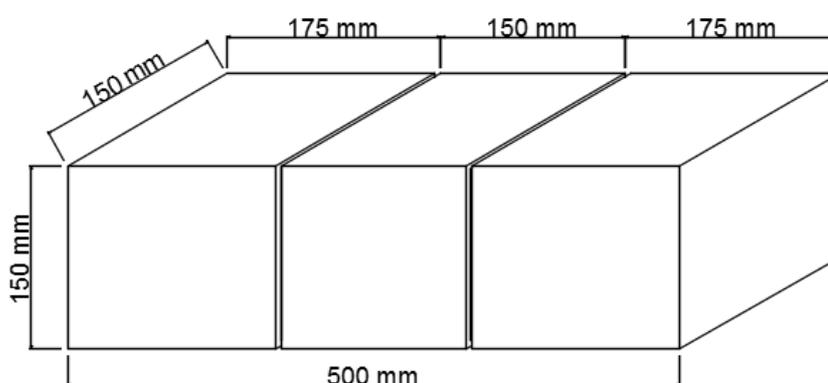


Figura 14 – Peça de concreto para ensaio de cisalhamento direto.

As formas nas quais se moldaram as peças prismáticas foram montadas com chapas de MDF (sigla em inglês para placa de fibra de média densidade) revestidas com material laminado.

Para a determinação da posição do plano de ruptura, a seção transversal da peça foi reduzida empregando-se perfis de aço na parte interna da forma, com, aproximadamente, 2,5 mm de espessura e 15 mm de profundidade, sendo instalados nas quatro faces do corpo de prova a uma distância de 175 mm das extremidades (distância esta já englobando o perfil de aço), ficando a parte central com 150 mm de comprimento. Desta forma, o plano cisalhante foi reduzido para, aproximadamente, 120 mm x 120 mm.

3.4 Procedimentos do ensaio de cisalhamento direto e instrumentação

Transcorridos 28 dias de idade, a partir da data de produção das peças de concreto em cada betonada, foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral nos corpos de prova cilíndricos, e resistência ao cisalhamento direto nas peças prismáticas, conforme recomendações das normas NBR 5739 (ABNT, 2007), NBR 7222 (ABNT, 2011) e norma japonesa SF6 (JSCE, 1990), respectivamente. Para isso, foi utilizada a máquina do tipo universal disponível no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UNIPAR, *campus* Toledo (Figura 15).

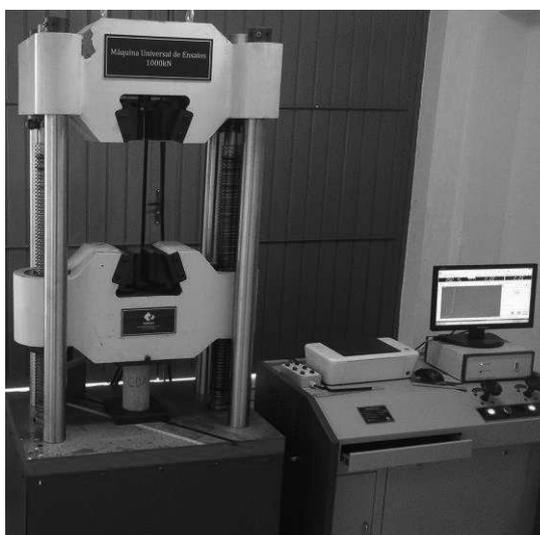


Figura 15 – Máquina de ensaios do tipo universal utilizada para romper as peças de concreto.

A Figura 16 demonstra, esquematicamente, o ensaio de resistência ao cisalhamento direto, onde o corpo de prova é posicionado em um molde de aço composto por um bloco superior com duas arestas cortantes distantes entre si 150 mm e um bloco inferior com um par de bordas cortantes com 155 mm de distância entre si.

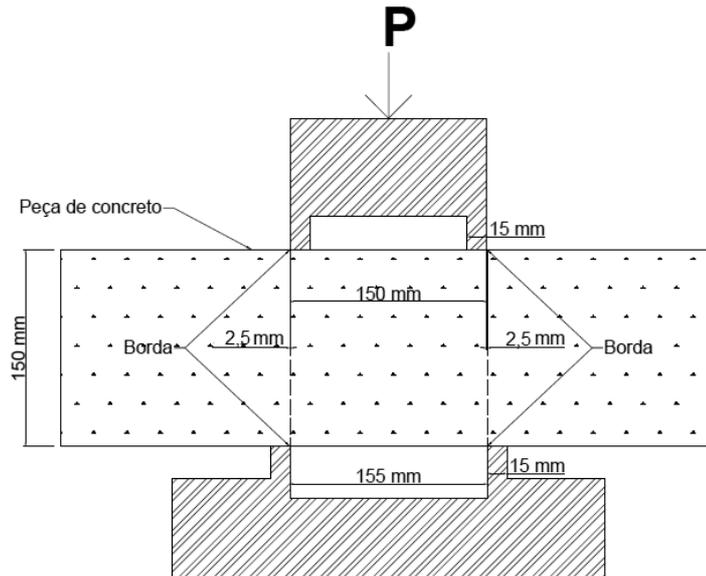


Figura 16 – Esquema do teste de cisalhamento direto.

Assim, formam-se dois planos de cisalhamento submetidos a um carregamento vertical aplicado de forma contínua com deslocamento controlado igual a 1 mm/min até a ruptura da peça.

Para medição da carga aplicada em cada corpo de prova, foi utilizada a célula de carga existente na máquina de ensaios, já o deslocamento vertical do plano de cisalhamento fora mensurado com o auxílio de um extensômetro instalado na peça central, este último foi referenciado em uma barra metálica fixada na face inferior do corpo de prova, como apresentado na Figura 17.

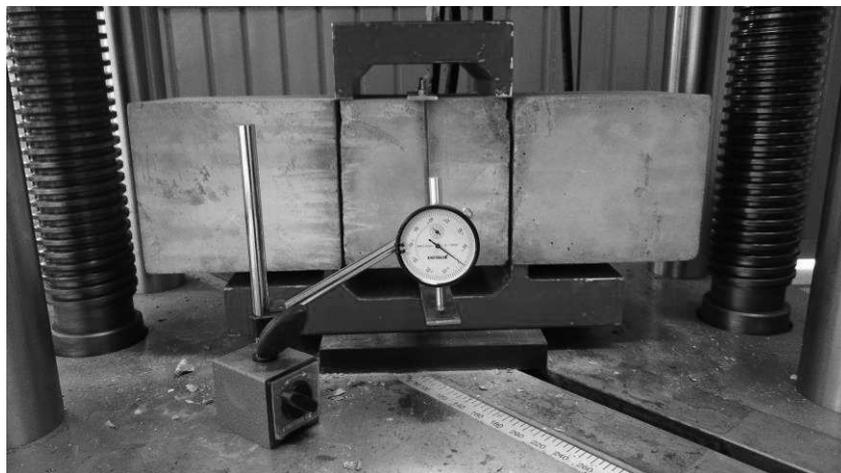


Figura 17 – Instrumentação do deslocamento do plano de cisalhamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os concretos foram analisados estatisticamente quanto às resistências à compressão e tração obtidas nos corpos de prova cilíndricos, e às tensões últimas de cisalhamento e deslocamentos verticais obtidos nos corpos de prova prismáticos.

Este item apresenta os resultados obtidos nos ensaios experimentais sendo comparados entre as dosagens utilizadas.

4.1 Caracterização dos agregados

O agregado miúdo pôde ser classificado como material fino por apresentar módulo de finura (M.F.) igual a 1,69 e dimensão máxima característica (D.M.C.) igual a 1,18 mm. Enquanto que a brita 0 e a brita 1 obtiveram resultados de 5,5 e 6,95 para M.F., e 9,5 e 19,0 mm para D.M.C., respectivamente.

As curvas granulométricas da areia, da brita 0 e da brita 1 estão demonstradas nos apêndices A, B e C, respectivamente.

Os agregados apresentaram massas específicas de 2,55 kg/dm³ para a areia, 2,88 kg/dm³ para a brita 0 e 2,91 kg/dm³ para a brita 1. No caso das massas específicas unitárias, os resultados foram de 1,577 kg/dm³ para a areia, 1,422 kg/dm³ para a brita 0 e 1,582 kg/dm³ para a brita 1.

Os teores de material pulverulento obtidos foram de 0,2% para o agregado miúdo, 1,2% para a brita 0 e 0,9% para a brita 1.

4.2 Caracterização dos concretos

A Figura 18 e a Tabela 12 demonstram os resultados de trabalhabilidade dos concretos confeccionados. As legendas C0, C40 e C80 referem-se às frações volumétricas de 0% (0 kg/m³), 0,5% (40 kg/m³) e 1,0% (80 kg/m³), respectivamente, de fibras de aço que foram acrescentadas em cada conjunto de concretos, e que foram utilizadas para facilitar a diferenciação entre tais misturas.

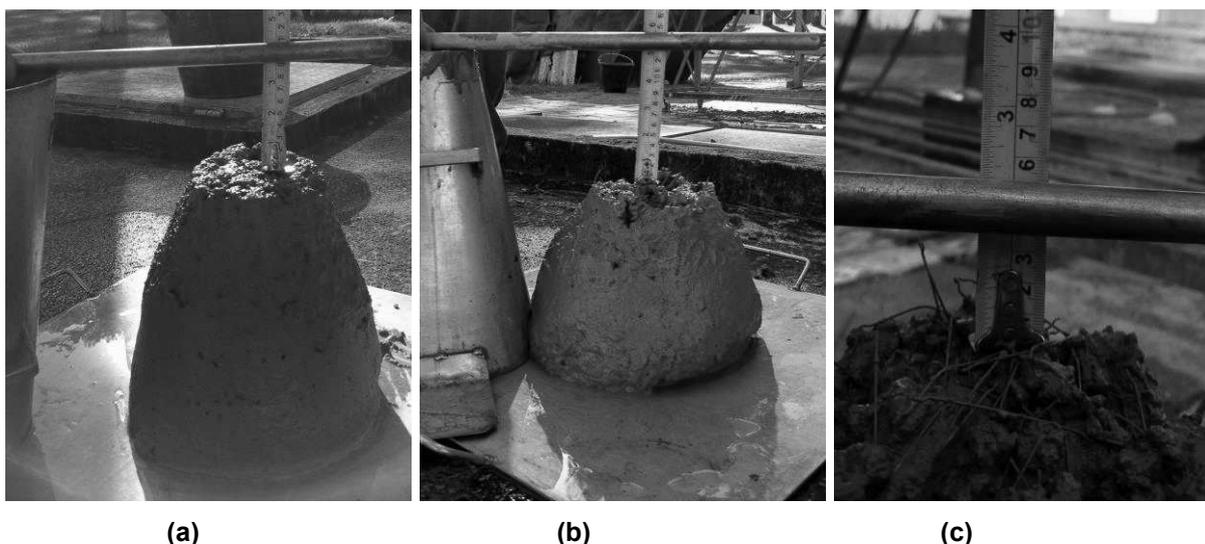


Figura 18 – Resultados obtidos de trabalhabilidade: (a) Concreto sem fibras (C0); (b) Concreto com 0,5% de fibras (C40); e (c) Concreto com 1,0% de fibras (C80).

Tabela 12 – Características dos concretos quanto à trabalhabilidade.

Corpos de prova	Trabalhabilidade (mm)
Peças C0	90
Peças C40	125
Peças C80	35

É importante salientar que havia sido estipulado um abatimento para todas as misturas de ± 100 mm, para que o trabalho de moldagem das peças fosse menos complexo e, também, houvesse certa garantia nos resultados adquiridos nos ensaios. As concretagens referentes às peças C0 e C40 apresentaram um abatimento mais próximo do esperado, porém na concretagem das peças C80, o valor de abatimento ficou mais distante dos 100 mm, conforme pode ser observado na Tabela 12.

Entretanto, para manter certo padrão, foi definido que seria utilizada a mesma quantidade de aditivo superplastificante Tec-Flow 8000 naquelas concretagens que dele necessitassem, ou seja, na tentativa de se corrigir essa tendência, para que não existissem peças de concreto no estado endurecido com espaços vazios ao serem desformadas (nichos de concretagem).

Sendo assim, nas concretagens referentes às peças C40 e C80 houve a necessidade de usar tal aditivo. Como na concretagem das peças C40 a quantidade

de 1% de aditivo, em relação à massa de cimento utilizada, foi suficiente para se obter um valor de trabalhabilidade de ± 100 mm, foi então definida essa mesma quantidade de aditivo para ser utilizada na concretagem das peças C80.

Porém, nessa última concretagem, ainda assim, não foi obtida uma trabalhabilidade de ± 100 mm, fato que pode ser explicado devido ao maior acréscimo de fibras de aço à mistura cimentícia. Para não ter a ocorrência de exsudação no concreto, ficou decidido que não seria mais acrescentado aditivo na mistura. Inobstante a isso, deu-se sequência a essa concretagem e a moldagem das peças de concreto.

Na Tabela 13 são apresentadas as resistências à compressão (f_c) obtidas para cada corpo de prova, além do desvio padrão (S) e da média calculada para cada dosagem ($f_{c,m}$).

Tabela 13 – Características dos concretos quanto à resistência à compressão.

Composições	Exemplar	Força Máxima (KN)	f_c (MPa)	S (MPa)	$f_{c,m}$ (MPa)
C0	A	343,00	43,67	1,96	41,47
	B	320,57	40,82		
	C	313,60	39,93		
C40	A	308,70	39,30	1,85	40,89
	B	337,10	42,92		
	C	317,65	40,44		
C80	A	243,20	30,97	8,23	34,66
	B	227,10	28,92		
	C	346,30	44,09		

Observa-se que os valores obtidos de resistência à compressão diminuíram com aumento no acréscimo de fibras de aço no compósito. Esta situação também aconteceu nos experimentos feitos por Malatesta e Contreras (2009) e nos feitos por Boulekbache et al. (2012).

Boulekbache et al. (2012) até fazem uma análise deste acontecimento em seu trabalho, afirmando que isso normalmente ocorre devido o acréscimo de fibras na matriz de concreto introduzir vazios em volta das próprias fibras, induzindo defeitos

adicionais na matriz através de compacidade insuficiente, havendo então maiores porosidades naquelas peças de concreto que tiverem fibras de aço como reforço.

Todavia, Boulekbache et al. (2012) também constataram em seus ensaios de resistência à compressão que a adição de fibras de aço no concreto faz com que haja uma menor ocorrência de fissuras e não ocasione ruptura imediata do concreto, diferentemente das peças de concreto sem acréscimo de fibras.

Para avaliar a significância da variação das resistências foi realizada uma análise estatística dos resultados obtidos. Para isso, foram empregados os procedimentos que envolvem o *Teste-t de Student*, o qual foi utilizado para avaliar se há diferença significativa entre as médias de duas composições por vez. Os relatórios dessas análises estão demonstrados na Tabela 14 (relação entre as peças C0 e C40), Tabela 15 (relação entre as peças C40 e C80) e Tabela 16 (relação entre as peças C0 e C80).

Neste tipo de teste para o caso em específico, foi fixada, inicialmente, a hipótese $H_0: \mu = \mu_0$. Entretanto, dependendo da informação que é fornecida na comparação feita, pode-se chegar à hipótese alternativa, que pode ter uma das três formas abaixo:

$$H_1: \mu \neq \mu_0 \text{ (teste bilateral);}$$

$$H_1: \mu > \mu_0 \text{ (teste unilateral à direita);}$$

$$H_1: \mu < \mu_0 \text{ (teste unilateral à esquerda).}$$

Em todas as análises foi fixado o nível de significância $\alpha = 5\%$, ou seja, esta é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira.

Tabela 14 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência à compressão.

(continua)

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças - C40 (MPa)
Média	41,47238286	40,89008798
Variância	3,826011641	3,417806695
Observações	3	3
Variância agrupada	3,621909168	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	4	

Tabela 14 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência à compressão.

(conclusão)

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças - C40 (MPa)
Valor de t	0,374731177	
P(T<=t) unilateral	0,363440784	
t crítico unilateral	2,131846786	
P(T<=t) bilateral	0,726881569	
t crítico bilateral	2,776445105	

Tabela 15 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C40 com as de C80 quanto à resistência à compressão.

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C40 (MPa)	Tensão Peças - C80 (MPa)
Média	40,89008798	34,65758041
Variância	3,417806695	67,81078276
Observações	3	3
Variância agrupada	35,61429473	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	4	
Valor de t	1,279075764	
P(T<=t) unilateral	0,135016128	
t crítico unilateral	2,131846786	
P(T<=t) bilateral	0,270032257	
t crítico bilateral	2,776445105	

Tabela 16 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência à compressão.

(continua)

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças - C80 (MPa)
Média	41,47238286	34,65758041
Variância	3,826011641	67,81078276
Observações	3	3
Variância agrupada	35,8183972	
Hipótese da diferença de média	0	

Tabela 16 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência à compressão.

(conclusão)

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças – C80 (MPa)
Graus de liberdade	4	
Valor de t	1,394587688	
P(T<=t) unilateral	0,11780164	
t crítico unilateral	2,131846786	
P(T<=t) bilateral	0,235603281	
t crítico bilateral	2,776445105	

Fazendo-se análises nos resultados apresentados nas tabelas acima, observa-se que em todas as comparações ocorreram a situação de $P > \alpha$ e $|t| < |t_{crítico}|$, tanto no teste unilateral como no bilateral. Este fato representa a condição de que a comparação entre os valores de resistência à compressão não possuem, estatisticamente, variação considerável. Aceitando assim a hipótese inicial $H_0: \mu = \mu_0$, a qual diz que as médias das amostras são iguais entre si.

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 17, sendo que as variáveis f_t , S e $f_{t,m}$ representam as resistências à tração por compressão diametral obtidas para cada corpo de prova, desvio padrão e média calculada para cada dosagem, respectivamente.

Tabela 17 – Características dos concretos quanto à tensão de tração por compressão diametral.

(continua)

Composições	Exemplar	Força Máxima (KN)	f_t (MPa)	S (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)
C0	D	164,33	5,23	0,49	4,90
	E	160,89	5,12		
	F	136,27	4,34		
C40	D	145,75	4,64	0,24	4,80
	E	146,90	4,68		
	F	159,55	5,08		

Tabela 17 – Características dos concretos quanto à tensão de tração por compressão diametral.

(conclusão)					
Composições	Exemplar	Força Máxima (KN)	f_t (MPa)	S (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)
C80	D	257,70	8,20	1,48	6,82
	E	219,30	6,98		
	F	165,35	5,26		

Teoricamente, de acordo ao acréscimo de fibras de aço na mistura, sua resistência à tração tende a aumentar. Fato este que ocorreu somente quando se acrescentou no compósito 80 kg/m³ de fibras de aço.

Assim como foi feito em relação à compressão, também foi avaliada a significância da variação das resistências à tração por meio de uma análise estatística utilizando os procedimentos que envolvem o *Teste-t de Student*. Desta forma, os relatórios dessas análises são demonstrados na Tabela 18 (relação entre as peças C0 e C40), Tabela 19 (relação entre as peças C40 e C80) e Tabela 20 (relação entre as peças C0 e C80).

Tabela 18 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência à tração por compressão diametral.

<i>Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</i>		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças - C40 (MPa)
Média	4,896560979	4,797991018
Variância	0,237318124	0,059405454
Observações	3	3
Variância agrupada	0,148361789	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	4	
Valor de t	0,313421789	
P(T<=t) unilateral	0,384811741	
t crítico unilateral	2,131846786	
P(T<=t) bilateral	0,769623482	
t crítico bilateral	2,776445105	

Tabela 19 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C40 com as de C80 quanto à resistência à tração por compressão diametral.

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C40 (MPa)	Tensão Peças – C80 (MPa)
Média	4,797991018	6,81554518
Variância	0,059405454	2,180716416
Observações	3	3
Variância agrupada	1,120060935	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	4	
Valor de t	-2,334801731	
P(T<=t) unilateral	0,0399156	
t crítico unilateral	2,131846786	
P(T<=t) bilateral	0,079831201	
t crítico bilateral	2,776445105	

Tabela 20 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência à tração por compressão diametral.

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças – C80 (MPa)
Média	4,896560979	6,81554518
Variância	0,237318124	2,180716416
Observações	3	3
Variância agrupada	1,20901727	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	4	
Valor de t	-2,137473683	
P(T<=t) unilateral	0,049684735	
t crítico unilateral	2,131846786	
P(T<=t) bilateral	0,09936947	
t crítico bilateral	2,776445105	

Constata-se, pelas tabelas acima, que nas comparações entre as peças C40 e C80 e também entre as peças C0 e C80 ocorreram, no teste unilateral, a situação de $P < \alpha$ e $|t| > |t_{crítico}|$. Isso representa a condição de que essas comparações rejeitam a hipótese inicial $H_0: \mu = \mu_0$ e aceitam a hipótese alternativa $H_1: \mu < \mu_0$, a

qual diz que a média das amostras C0 e C40 são significativamente menores que a média das amostras C80.

Entretanto, para o teste bilateral as comparações apresentaram a situação de $P > \alpha$ e $|t| < |t_{critico}|$, a qual aceita a hipótese inicial $H_0: \mu = \mu_0$ e diz que as médias das amostras são iguais entre si. Por isso, não se pode dizer que se acrescentada uma quantidade significativa de fibras de aço no compósito, seu valor apresentará um aumento de desempenho considerável quanto à tração.

4.3 Resistência ao cisalhamento direto

Os valores experimentais de força máxima de ruptura por cisalhamento das peças de concreto prismáticas foram obtidos utilizando o método de ensaio da norma japonesa SF6 (JSCE, 1990). Para cada exemplar prismático foi obtido um valor de força máxima e com a determinação das dimensões da seção da área cisalhada, obtida com o auxílio de um paquímetro eletrônico, foram determinadas as resistências máximas ao cisalhamento direto, utilizando a Equação (18).

$$\tau_u = F_u / (2 \cdot A_m) \quad (18)$$

Sendo:

τ_u → Resistência máxima ao cisalhamento direto;

F_u → Força máxima de ruptura por cisalhamento direto;

A_m → Área média entre as duas faces cisalhadas.

Na Tabela 21 são demonstrados os resultados de força máxima de ruptura por cisalhamento direto (F_u), área cisalhada (A_m) e tensão de cisalhamento (τ_u) em cada corpo de prova ensaiado, além do desvio padrão médio (S) e da tensão de cisalhamento média ($\tau_{u,m}$) para cada conjunto de peças (C0, C40 e C80).

Tabela 21 – Resultados obtidos no método de ensaio da norma japonesa SF6 (JSCE, 1990).

Composições	Corpos de prova	Força Máxima, F_u (KN)	A_m (mm ²)	τ_u (MPa)	S (MPa)	$\tau_{u,m}$ (MPa)
C0	A	119,04	12789,17	9,31	1,33	8,22
	B	114,31	12434,45	9,19		
	C	82,26	12093,40	6,80		
	D	123,45	13248,77	9,32		
	E	103,32	12383,20	8,34		
	F	80	12609,04	6,34		
C40	A	121,25	12531,67	9,68	1,54	8,79
	B	144,45	12924,07	11,18		
	C	92,75	12558,16	7,39		
	D	114,35	12881,14	8,88		
	E	107,50	12453,04	8,63		
	F	85,00	12207,14	6,96		
C80	A	120,90	11989,69	10,08	0,83	9,73
	B	122,10	12297,11	9,93		
	C	125,30	12071,19	10,38		
	D	127,85	12091,76	10,57		
	E	103,70	12182,24	8,51		
	F	108,35	12183,72	8,89		

Constata-se que a resistência ao cisalhamento média aumenta de acordo ao acréscimo de fibras de aço na mistura cimentícia, isso também aconteceu nos ensaios feitos por Mirsayah e Banthia (2002), Malatesta e Contreras (2009) para a fibra do tipo RC-65/35-BN, Boulekbache et al. (2012) e, ainda, nos realizados por Araújo et al. (2014). Comprovando assim que esse tipo de reforço traz benefícios ao concreto convencional quando solicitado por tensões cisalhantes. Na Figura 19 são apresentadas as resistências médias com os respectivos desvios padrões dos exemplares de concreto C0, C40 e C80.

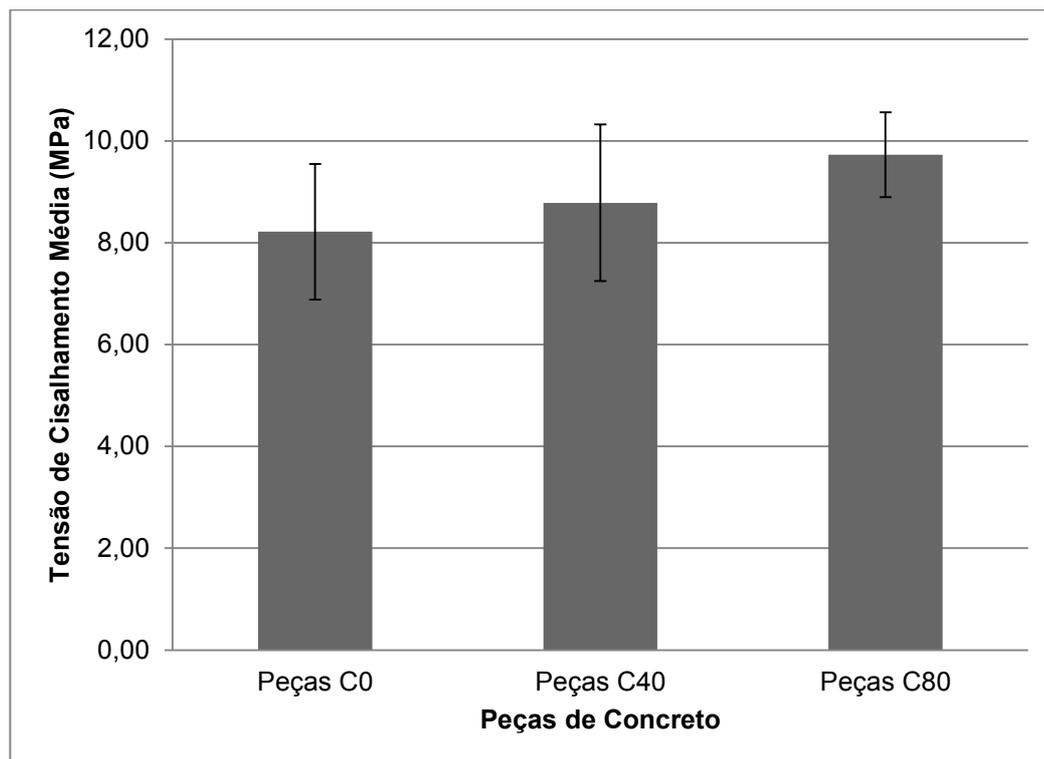


Figura 19 – Relação entre as peças C0, C40 e C80 com seus respectivos valores de tensão de cisalhamento e desvio padrão médios.

Quanto aos valores de resistência ao cisalhamento obtidos nas amostras de C0, C40 e C80, também foi feita uma avaliação da significância da variação destas resistências por meio do uso dos procedimentos que envolvem o *Teste-t de Student*, para assim dizer se há diferença significativa entre as médias de duas composições por vez. Os relatórios dessas análises estão demonstrados na Tabela 22 (relação entre as peças C0 e C40), Tabela 23 (relação entre as peças C40 e C80) e Tabela 24 (relação entre as peças C0 e C80).

Tabela 22 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência ao cisalhamento.

(continua)

<i>Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</i>		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças - C40 (MPa)
Média	8,218167185	8,785137418
Variância	1,775642456	2,364589808
Observações	6	6
Variância agrupada	2,070116132	

Tabela 22 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C40 quanto à resistência ao cisalhamento.

(conclusão)

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças - C40 (MPa)
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	10	
Valor de t	-0,682532806	
P(T<=t) unilateral	0,25520147	
t crítico unilateral	1,812461123	
P(T<=t) bilateral	0,510402941	
t crítico bilateral	2,228138852	

Tabela 23 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C40 com as de C80 quanto à resistência ao cisalhamento.

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C40 (MPa)	Tensão Peças – C80 (MPa)
Média	8,785137418	9,728604973
Variância	2,364589808	0,696328453
Observações	6	6
Variância agrupada	1,530459131	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	10	
Valor de t	-1,320920648	
P(T<=t) unilateral	0,107978045	
t crítico unilateral	1,812461123	
P(T<=t) bilateral	0,215956091	
t crítico bilateral	2,228138852	

Tabela 24 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência ao cisalhamento.

(continua)

Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças – C80 (MPa)
Média	8,218167185	9,728604973
Variância	1,775642456	0,696328453
Observações	6	6

Tabela 24 – Relatório da análise estatística feita para se comparar as amostras de C0 com as de C80 quanto à resistência ao cisalhamento.

(conclusão)

<i>Teste-t de Student: duas amostras presumindo variâncias equivalentes</i>		
	Tensão - Peças C0 (MPa)	Tensão Peças – C80 (MPa)
Variância agrupada	1,235985455	
Hipótese da diferença de média	0	
Graus de liberdade	10	
Valor de t	-2,353188892	
P(T<=t) unilateral	0,020210096	
t crítico unilateral	1,812461123	
P(T<=t) bilateral	0,040420192	
t crítico bilateral	2,228138852	

Observa-se que nas comparações entre as peças C0 e C40 e, também, entre as peças C40 e C80, houve a ocorrência de $P > \alpha$ e $|t| < |t_{crítico}|$, tanto no teste unilateral como no bilateral. Aceitando, dessa forma, a hipótese inicial $H_0: \mu = \mu_0$, não havendo assim variação estatística considerável entre os valores comparados.

Porém, na comparação entre as peças C0 e C80 teve a ocorrência de $P < \alpha$ e $|t| > |t_{crítico}|$, tanto no teste unilateral como no bilateral. As quais aceitam as hipóteses alternativas $H_1: \mu < \mu_0$ e $H_1: \mu \neq \mu_0$ para os testes unilateral e bilateral, respectivamente. Este fato representa a condição de que os valores de resistência ao cisalhamento entre as peças C0 e C80 possuem, estatisticamente, variação considerável, ou seja, o acréscimo de 1% de fibras de aço na mistura contribuiu significativamente no aumento da resistência ao cisalhamento quando comparado ao concreto sem fibras de aço.

4.4 Avaliação do deslocamento vertical

A fim de avaliar a influência da adição de fibras de aço no deslocamento vertical, foram elaborados gráficos de tensão de cisalhamento vs. deslocamento vertical, apresentados na Figura 20.

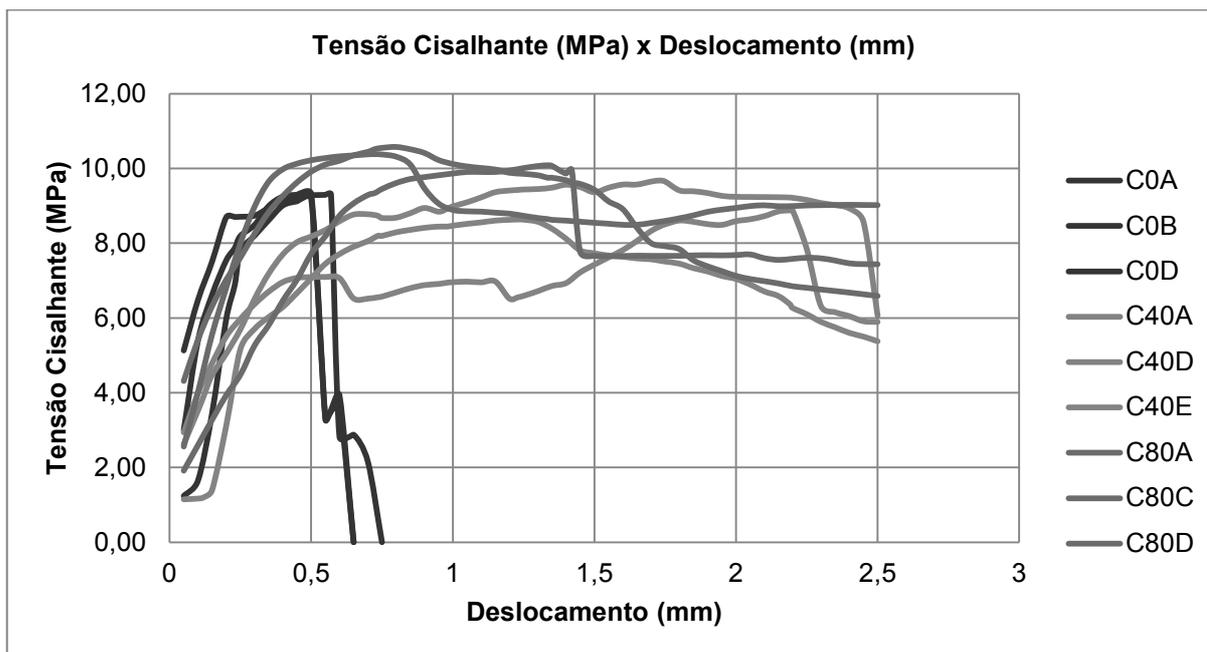


Figura 20 – Relação entre tensão cisalhante com deslocamento vertical de três peças de concreto por composição.

Para as peças de concreto sem fibras de aço (C0) foram medidos os deslocamentos até o momento de ruptura do corpo de prova e para as peças reforçadas com fibras de aço (C40 e C80) foram anotados os valores até o deslocamento vertical de 2,5 mm. Além disso, foram registrados os deslocamentos verticais em apenas três exemplares de concreto em cada composição (C0, C40 e C80).

Os exemplares de C0 não apresentaram comportamento pós-ruptura, diferentemente das peças C40 e C80, as quais tiveram deslocamentos verticais mesmo após a carga máxima ter sido alcançada em cada peça de concreto.

Além de não ocorrer ruptura total nas peças reforçadas com fibras de aço, ao menos até o deslocamento de 2,5 mm adotado como limite, também houveram momentos em que esses corpos de prova, mesmo tendo uma pequena fissuração, controlaram a diminuição da carga aplicada, não havendo uma diminuição drástica da resistência em um curto espaço de deslocamento vertical, o que corresponde ao comportamento pseudo-dúctil já mencionado na revisão bibliográfica. Circunstância esta que também ocorreu em experimentos de outros autores (Mirsayah e Banthia (2002), Malatesta e Contreras (2009), Boulekbache et al. (2012) e Araújo et al. (2014)).

4.5 Comparação entre os resultados de cisalhamento obtidos experimentalmente com os apresentados na revisão bibliográfica

Os resultados obtidos de resistência ao cisalhamento nos ensaios experimentais foram comparados com os encontrados nos estudos feitos por Mirsayah e Banthia (2002) e por Malatesta e Contreras (2009). Para a referida comparação se dar de forma mais eficiente, foram utilizados os valores de tensão normalizada para cada caso, que são encontrados por meio da Equação (19).

$$\tau_n = \tau_{u,m} / (\sqrt{f_{c,m}}) \quad (19)$$

Sendo:

τ_n → Tensão normalizada;

$\tau_{u,m}$ → Resistência ao cisalhamento média;

$f_{c,m}$ → Resistência à compressão média.

Nas Figuras 21, 22 e 23 são apresentados os gráficos comparativos entre a tensão experimental normalizada com as tensões normalizadas obtidas nos ensaios de Mirsayah e Banthia (2002) e de Malatesta e Contreras (2009) para os percentuais de 0%, 0,5% e 1,0%, respectivamente, de adição de fibras de aço na mistura cimentícia.

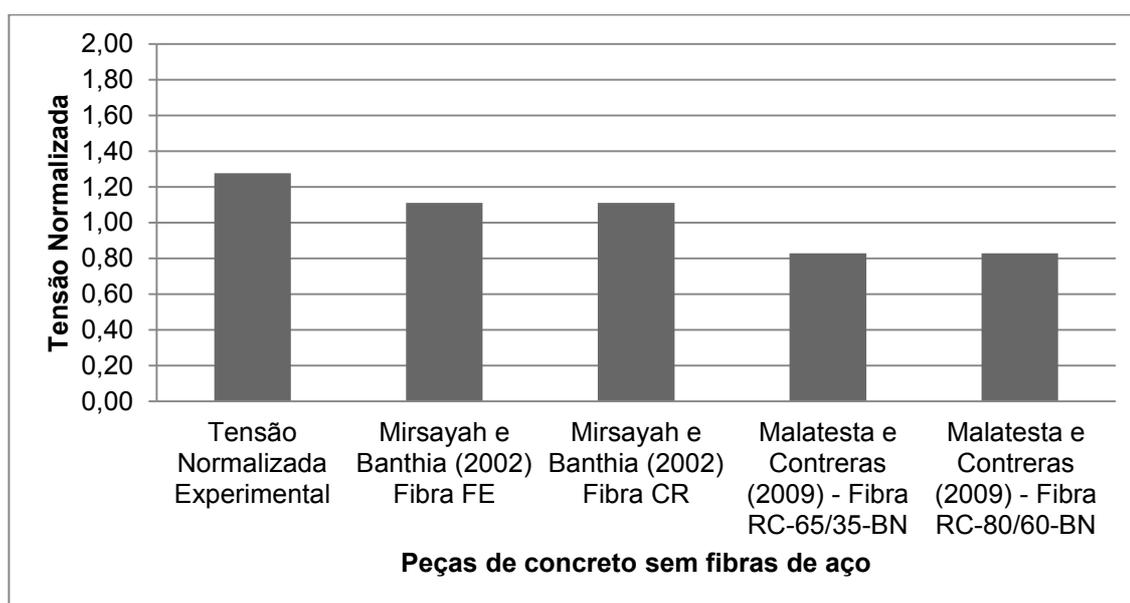


Figura 21 – Comparação entre as tensões normalizadas para o percentual de 0% de acréscimo de fibras de aço no compósito.

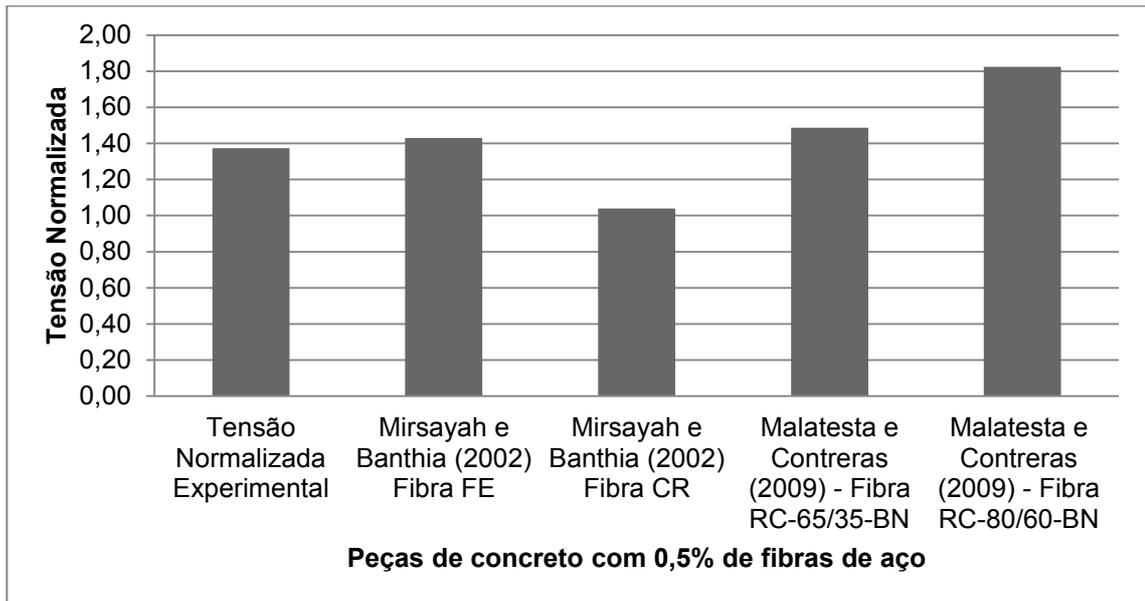


Figura 22 – Comparação entre as tensões normalizadas para o percentual de 0,5% de acréscimo de fibras de aço no composto.

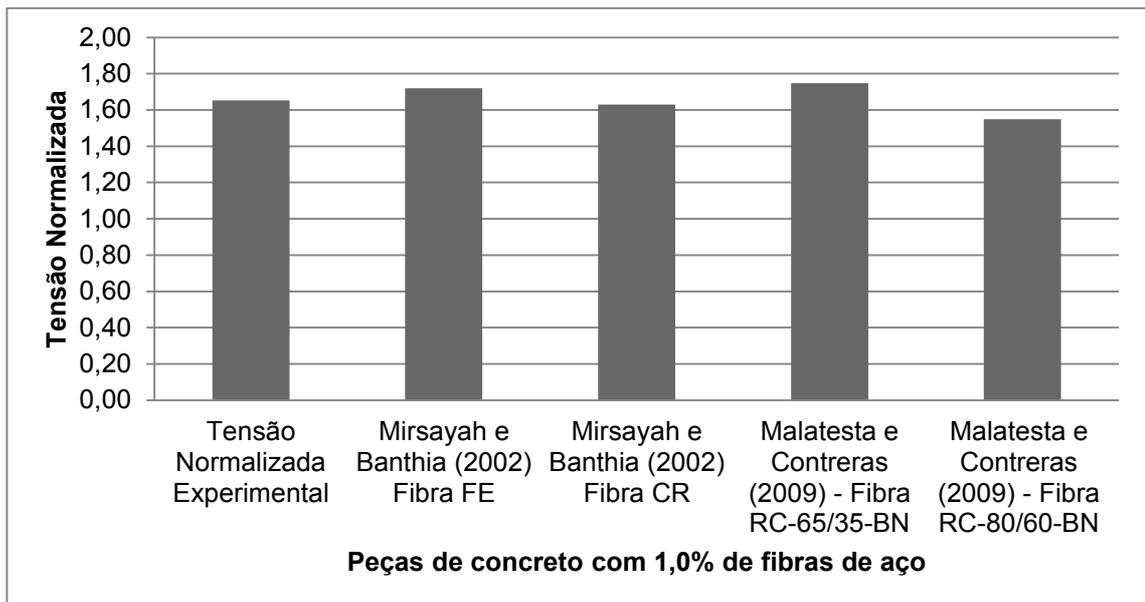


Figura 23 – Comparação entre as tensões normalizadas para o percentual de 1,0% de acréscimo de fibras de aço no composto.

Ainda que o concreto sem fibras de aço confeccionado no presente estudo tenha apresentado a maior tensão normalizada entre todos os valores demonstrados na Figura 21 e, ainda, tenha aumentado sua tensão normalizada de acordo ao acréscimo de fibras de aço na mistura, conforme demonstram as Figuras 22 e 23,

essa melhora da tensão não teve a mesma eficiência apresentada pelas fibras FE e RC-65/35-BN utilizadas pelos autores em seus respectivos estudos.

Uma das fibras estudadas por Malatesta e Contreras foi a mesma utilizada neste experimento, que é a fibra RC-80/60-BN. Sendo assim, enquanto a tensão normalizada experimental aumentava de acordo ao acréscimo de fibras na mistura, nos experimentos feitos por Malatesta e Contreras, para a fibra RC-80/60-BN, a tensão normalizada teve um ápice no acréscimo de 0,5%, até maior que todos os outros valores apresentados para este percentual, e nas outras duas situações houve quedas expressivas de suas respectivas tensões normalizadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Feitas as comparações e análises de resultados obtidos para trabalhabilidade, resistências à compressão, à tração por compressão diametral e ao cisalhamento e, ainda, deslocamentos verticais para os diferentes concretos (C0, C40 e C80), pode-se concluir que:

- Quanto maior o acréscimo de fibras de aço na matriz cimentícia, menor foi o resultado obtido de trabalhabilidade. Essa tendência foi corrigida com a utilização de certa quantidade de aditivo superplastificante. Embora o uso do aditivo não tenha feito com que a concretagem das peças C80 atingisse o valor ideal de trabalhabilidade, deu-se sequência aos estudos e não ocorreram nichos de concretagem quando essas peças foram desmoldadas.

- Os valores de resistência à compressão obtidos nas peças de concreto foram diminuindo de acordo à maior adição de fibras de aço na matriz. Esse comportamento, segundo Boulekbache et al. (2012), ocorre devido ao acréscimo de fibras resultar em vazios nas peças, induzindo defeitos de compacidade insuficiente e provocando porosidades que contribuem na diminuição da resistência à compressão. Entretanto, pelo método estatístico do *Teste-t de Student*, os valores médios encontrados não apresentaram variação significativa quando comparados entre si.

- No caso da resistência à tração por compressão diametral, os resultados encontrados variaram tanto positivo como negativamente com a adição de fibras de aço no compósito, havendo um aumento significativo desse tipo de resistência quando se acrescentou na mistura 1% de fibras de aço. Essa variação, pelo *Teste-t de Student* no teste unilateral, foi estatisticamente considerável, porém, para o teste bilateral, não ocorreu variação significativa.

- As peças C0 e C40 não apresentaram tensões cisalhantes com valores significativamente distintos entre si, enquanto que as peças C80 demonstraram certa variação significativamente positiva quando comparadas às peças C0. Fato comprovado estatisticamente pelo método do *Teste-t de Student*.

- O acréscimo de fibras no concreto não só aumentou a resistência ao cisalhamento como também evitou a ruptura abrupta da peça de concreto. Isto pode

ser comprovado comparando os deslocamentos verticais medidos durante os ensaios. As peças C0 demonstraram rupturas quase imediatas após a primeira fissura, enquanto que as peças C40 e C80 apresentaram comportamento pós-ruptura.

- O tipo de fibra utilizado neste experimento não apresentou valores tão expressivos como alguns empregados pelos autores citados na revisão bibliográfica que fizeram experimentos com CRFA. Porém, os resultados obtidos apresentaram certa proporcionalidade e, quando comparados aos resultados demonstrados por um dos autores que utilizou o mesmo tipo de fibra, demonstram maior coerência e confiabilidade.

Portanto, diante dos resultados encontrados, pôde-se comprovar a teoria inicial de que o concreto reforçado com fibras de aço apresenta uma melhora significativa no que se refere à tensão de cisalhamento e prevenção de rupturas frágeis da estrutura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAUJO, Daniel de L.; NUNES, Fernanda G. T.; TOLEDO FILHO, Romildo D.; ANDRADE, Moacir A. S. de. **Resistência ao cisalhamento de vigas de concreto reforçado com fibras de aço**. Acta Scientiarum Technology. Maringá, v. 36, n. 3, p. 389-397, julho-setembro 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 46**: Determinação do teor de material pulverulento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

BARRAGAN, Bryan; GETTU, Ravindra; AGULLO, Luis; ZERBINO, Raúl. **Falha de cisalhamento do concreto armado com fibras de aço baseada em ensaios de compressão**. Instituto Americano de Concreto, Estados Unidos, Mater J, v. 103(4), p. 251–257, 2006.

BARROS, Alexandre R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço**. 2009. 155p. Dissertação (Pós-graduação) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2009.

BENTUR, Arnon; MINDESS, Sidney. **Compostos de cimento reforçados com fibras**. Reino Unido, cidade de Barking, editora Elsevier, 1990.

BIRKELAND, Philip W.; BIRKELAND, Halvard W. **Conexões em pré-fabricados de concreto**. Periódico do Instituto Americano de Concreto (procedimentos), Estados Unidos, v. 63, n. 3, p. 345-367, março 1966.

BOULEKBACHE, Bensaid; HAMRAT, Mostefa; CHEMROUK, Mohamed; AMZIANE, Sofiane. **Influência no comportamento da resistência ao cisalhamento e à compressão em concreto armado reforçado com fibras de aço**. Periódico da revista Construção e Materiais de Construção, Estados Unidos, v. 27(1), p. 6-14, 2012.

BRAZ, Mariane C. de A.; NASCIMENTO, Felipe B. C. do. **Concreto reforçado com fibras de aço**. Ciências exatas e tecnológicas. Maceió, v. 3, n. 1, p. 43-56, novembro 2015.

CAPUTO, Homero P. **Tensões e Deformações. Elasticidade, Plasticidade e Reologia**. Mecânica dos Solos e Suas Aplicações - Fundamentos, v.1, 6ª ed., capítulo 10, Rio de Janeiro – RJ: LTC (Livros Técnicos e Científicos), 1988.

FEDERAÇÃO INTERNACIONAL DE PROTENSÃO. **Cisalhamento na interface do concreto pré-moldado e local**. Relatório técnico, FIP, Lausanne, Suíça. 1978.

FIGUEIREDO, Antônio D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2000.

FIGUEIREDO, Antônio D. **Concreto com fibras**. Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. São Paulo: IBRACON, v. 2, capítulo 39, p. 1195-1225, 2005a.

FIGUEIREDO, Antônio D.; CHAMA NETO, Pedro J.; FARIA, Hernando M. **A nova normalização brasileira sobre fibras de aço**. Revista Concreto & Construções, São Paulo, v. 36, n. 50, p. 67-76, abril/maio/junho 2008.

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

GÓIS, Fernanda A. P. **Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto**. 2010. 156p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2010.

HOFFBECK, J. A.; IBRAHIM, I. O.; MATTOCK, Alan H. **Transferência de cisalhamento em concreto armado**. Periódico do Instituto Americano de Concreto, Estados Unidos, v. 66(2), p. 119-128, 1969.

JOHNSTON, Colin D. **Cimento e concreto reforçado com fibras: avanços tecnológicos do concreto**. 2ª ed. Londres, p. 603-673, 1994.

JUDICE, Flávia M. de S. **Comportamento da ligação entre lajes e vigas pré-fabricadas feita com nichos preenchidos no local**. 2002. 383p. Dissertação (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, dezembro 2002.

KHALOO, Ali R.; KIM, Nakseok. **Influência das características do concreto e da fibra sobre o comportamento do concreto armado com fibra de aço sob cisalhamento direto**. Periódico de Materiais do Instituto Americano de Concreto, Estados Unidos, v. 94(6), p. 596-601, 1997.

KHANLOU, Amir; MACRAE, Gregory A.; SCOTT, Allan N.; HICKS, Stephen J.; CLIFTON, George C. **Desempenho de cisalhamento de concreto armado com fibra de aço**. Conferência de Inovações em Aço, Christchurch, Nova Zelândia. 21 e 22 de fevereiro, 2013.

MALATESTA, Sergio C.; CONTRERAS, Manuel C. **Comportamento ao corte de cisalhamento do concreto armado com fibras de aço**. Universidade Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. Revista Ingeniería de Construcción, v. 24, n. 1, abril 2009.

MAST, Robert F. **Reforço Auxiliar em Conexões de Concreto**. Periódico da Divisão de Estruturas, ASCE (Sociedade Americana de Engenheiros Civis), Estados Unidos, v. 94, n. ST6, p. 1485-1504, junho 1968.

MATTOCK, Alan H., HAWKINS, Neil. M. **Transferência de cisalhamento em concreto armado – pesquisa recente**. Periódico do PCI (Instituto de Concreto Pré-moldado), Estados Unidos, v. 17, n. 2, p. 55-75, março/abril 1972.

MATTOCK, Alan H.; JOHAL, Paul L. S.; CHOW, Hwang-Cherng. **Transferência de cisalhamento em concreto armado com momento ou tensão atuando em todo o plano de cisalhamento**. Periódico do PCI (Instituto de Concreto Pré-moldado), Estados Unidos, v. 20, n. 4, p. 76-93, julho/agosto 1975.

MEHTA, Povindar K; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2014. 674p.

MIRSAYAH, Amir A.; BANTHIA, Nemkumar. **Resistência ao cisalhamento de concreto armado com fibras de aço**. Periódico de Materiais do Instituto Americano de Concreto, Estados Unidos, v. 99(5), p. 473-479, 2002.

ONUKE, Michelle A. F.; GASPARETTO, Patrycia A. **Comparativo das propriedades do concreto no estado fresco e endurecido com adição de fibras de aço e de polipropileno**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba – PR, 2013.

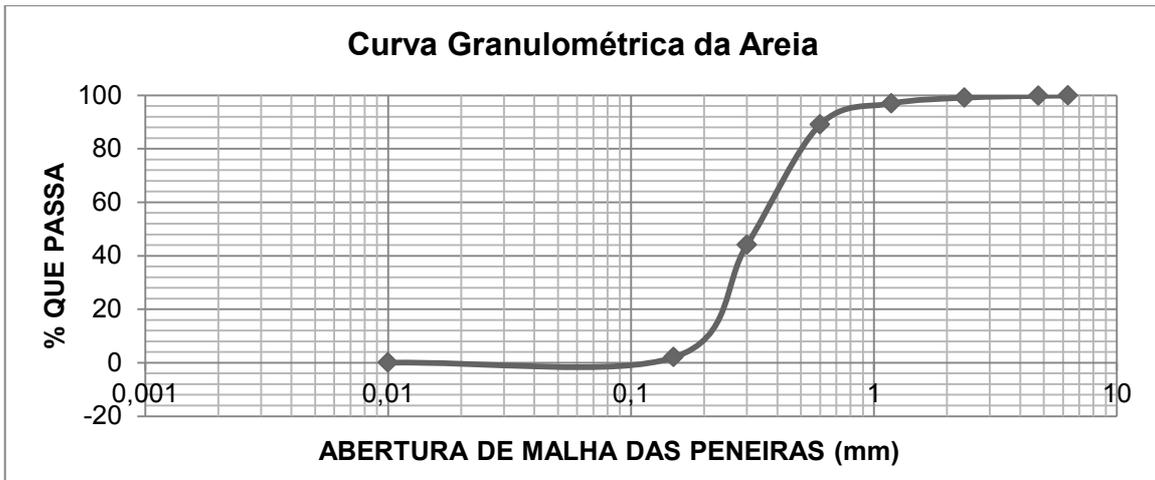
SOCIEDADE JAPONESA DE ENGENHEIROS CIVIS (JSCE). **Método de ensaio para resistência ao cisalhamento de concreto reforçado com fibras de aço (SFRC)**. Padrão JSCE-SF6, Tóquio, 1990.

SOCIEDADE JAPONESA DE ENGENHEIROS CIVIS – DIRETRIZES (JSCE-G 553-1999). **Método de ensaio para resistência ao cisalhamento de concreto reforçado com fibras de aço**. Especificações Padrão para Estruturas de Concreto, Métodos de Teste e Especificações, JSCE, Tóquio, 2005.

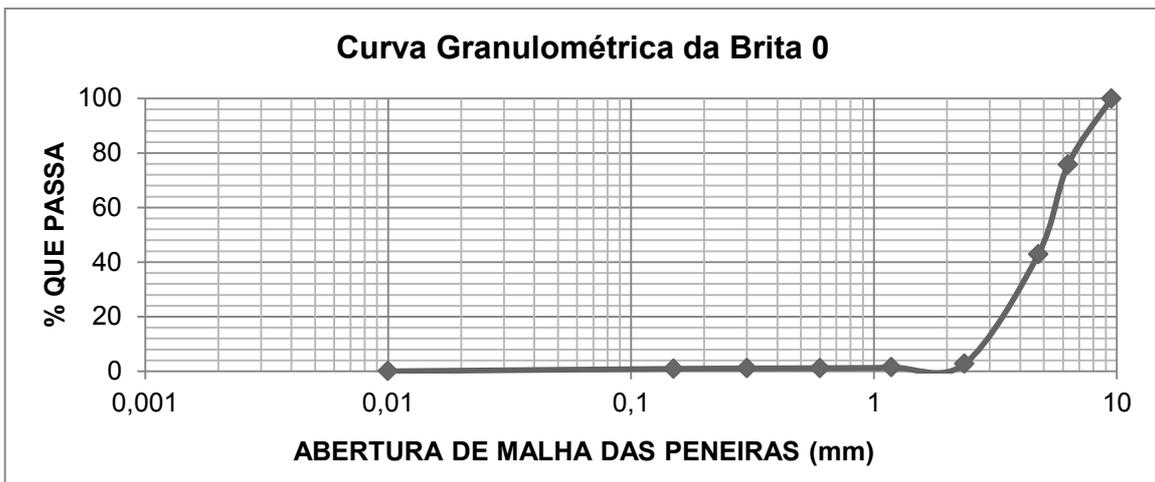
WALRAVEN, Joost C.; REINHARDT, Hans W. **Teoria e ensaios sobre o comportamento mecânico de fissuras em concreto plano e reforçado sujeitos a carga de cisalhamento**. Universidade Técnica de Delft, Países Baixos. HERON, v. 26(1A), 1981.

WATANABE, Paula S. **Concretos especiais: propriedades, materiais e aplicações**. Relatório final de pesquisa (Bolsa de Iniciação Científica FAPESP) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, fevereiro 2008, 192p.

APÊNDICE A



APÊNDICE B



APÊNDICE C

