

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
NATHALIA PAULA OLIVEIRA

**CONCRETO DE CIMENTO *PORTLAND* REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E
DE POLIPROPILENO**

FORMIGA– MG
2014

NATHALIA PAULA OLIVEIRA

CONCRETO DE CIMENTO *PORTLAND* REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO E
DE POLIPROPILENO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Civil do UNIFOR, como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Matheus de Faria e Oliveira
Barreto.

FORMIGA - MG
2014

O48 Oliveira, Nathalia Paula.
Concreto de cimento *Portland* reforçado com fibras de aço e de polipropileno / Nathalia Paula Oliveira. – 2014.
88 f.

Orientador: Matheus de Faria e Oliveira Barreto.
Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Centro
Universitário de Formiga–UNIFOR - MG, Formiga, 2014.

1. Concreto. 2. Fibras. 3. Reforço I. Título.


CDD 624.1834

Nathalia Paula Oliveira


CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO
E DE POLIPROPILENO

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Civil.

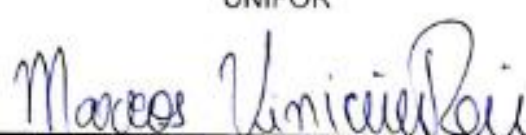
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Matheus de Faria e Oliveira Barreto
Orientador



Prof. Ms. Clésio Barbosa Lemos Júnior
UNIFOR



Prof. Esp. Marcos Vinícius Reis
UNIFOR

Formiga, 04 Novembro de 2014.

À Deus, à minha mãe Maria do Carmo,
ao meu pai Antonio Carlos e à minha
irmã Fernanda.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, meu Pai amado, que sempre está comigo, me protegendo e me dando forças. Obrigada Senhor por essa conquista, sem ti nada seria possível. Porque dele, por meio dele e para ele são todas as coisas.

À minha mãe Maria do Carmo, pelos ensinamentos de toda a vida, esses que fundamentaram o que hoje sou. Obrigada pelo seu carinho e imenso amor de mãe. Obrigada pelas orações e apoio.

Ao meu querido pai, Antonio Carlos, que em nenhum momento mediu esforços para fazer deste sonho realidade. Obrigada pelas palavras de incentivo, pela relação de carinho e amor.

A minha irmã Fernanda, que me apoiou tanto durante esses cinco anos. Sua presença significou confiança.

Ao meu namorado Felipe, pessoa com quem amo partilhar a vida. Obrigada pelo incentivo, paciência e companheirismo.

Ao meu orientador Matheus, dotado de tamanha sabedoria. Obrigada pela dedicação e ensinamentos. Obrigada pela confiança em mim prestada.

A todos meus colegas de sala, em especial Fabíola e Uiliam que se dispunham a me ajudar na realização deste trabalho a qualquer momento.

A minha amiga e companheira Amanda, que foi essencial nessa jornada, e fez amiga em todos os momentos. Obrigada.

A todo corpo docente do curso de Engenharia Civil do UNIFOR, que desde o primeiro período dividem seus conhecimentos comigo. Vocês foram fundamentais para a minha formação.

Ao Junio, Engenheiro da Maccaferri, que se mostrou prestativo e generoso, disponibilizando o material para a realização dessa pesquisa.

Aos funcionários do laboratório de concreto da Pavidez, Vitor, Fábio e Danilo, que doaram parte do seu tempo para a realização do experimento prático desse estudo.

E a todos aqueles, que acreditaram em mim, e contribuíram para a realização deste sonho, meu sincero muito obrigada.

RESUMO

O uso de fibras como reforço do concreto é um assunto que vem sendo estudado já há algum tempo. A necessidade de se ter um concreto menos frágil, impulsiona cada vez mais estudos e experimentos da área. O concreto reforçado com fibras, é um compósito de pasta de cimento, agregados e fibras, que são elementos descontínuos, que atuam na matriz de concreto, promovendo uma transferência de tensões. As fibras podem ser de aço, polipropileno, vidro, celulose etc. Cada tipo de fibra possui suas propriedades específicas. A incorporação de fibras no concreto promove mudanças no material tanto no seu estado fresco, quanto em seu estado endurecido. O presente trabalho consiste no estudo de alguns tipos de fibras, a fim de verificar a eficiência destas no concreto, os resultados finais buscaram uma análise do comportamento mecânico do compósito quando submetido à tensões.

Palavras chave: Concreto, fibras, reforço, comportamento mecânico.

ABSTRACT

The use of fibers as reinforcement of concrete is a subject that has been studied for some time now. The need to have a less brittle concrete drives more and more studies and experimentation in the area. The fiber-reinforced concrete is a composite of cement, aggregates and fibers, which are discrete elements, which act in the concrete matrix, promoting the transfer of stresses. The fibers can be steel, polypropylene, glass, cellulose etc. Each fiber type has its own specific properties. The incorporation of fibers in concrete promotes changes in the material both in its fresh state, and in its hardened state. The present work is the study of some types of fibers in order to verify the efficiency of the concrete. The end results sought an analysis of the mechanical behavior of the composite when subjected to stress.

Keywords: concrete, fiber reinforcement, mechanical behavior.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Características de interesse das fibras para matrizes cimentícias	23
Figura 2 – Classificação das fibras segunda BISFA.....	24
Figura 3 – Fibra de celulose	25
Figura 4 – Fibra de amianto	25
Figura 5 – Fibra de polipropileno.....	26
Figura 6 – Fibras metálicas coladas em forma de pentes	27
Figura 7 – Fibras metálicas de extremidades deformadas e soltas.....	28
Figura 8 – Classificação e geometria das fibras de aço	29
Figura 9 – Concreto com fissuras por retração	32
Figura 10 – Esquema de concentração de tensões no concreto: A - sem adição de fibras; B – com adição de fibras	33
Figura 11 – Ensaio de avaliação de trabalhabilidade Vebe.....	36
Figura 12 – Ouriço formado por agrupamento de fibras no concreto.....	37
Figura 13 – Conceituação de fator de forma da fibra.	45
Figura 14 – Esquema de aderência da fibra na interação fibra-matriz.....	47
Figura 15 - Concreto reforçado com fibras com compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo.....	50
Figura 16 - Concreto reforçado com fibras sem compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo.....	51
Figura 17 - Aplicações de concreto reforçados com fibras em (a) tubos de concreto, (b) concreto projetado, (c) pisos industriais e (d) rediers.	55
Figura 18 - Fluxograma simplificado do estudo.....	56
Figura 19 - Cimento Nacional CPV ARI MAX.....	58
Figura 20 - Areia utilizada no estudo	58
Figura 21 - Pedra britada utilizada no estudo.....	59
Figura 22 - Fibras de aço utilizadas no trabalho.....	60
Figura 23 - Fibras de polipropileno utilizadas no estudo	61
Figura 24 - Moldes para corpos de prova.....	61
Figura 25 - Prensa utilizada para o rompimento dos corpos de prova	62
Figura 26 - Pesagem dos materiais componentes do concreto (a) pesagem do cimento, (b) pesagem da areia, (c) pesagem da brita.....	63

Figura 27 - Slump Test realizado no experimento.....	64
Figura 28 - Adensamento do concreto	65
Figura 29 - Corpos de prova etiquetados	65
Figura 30 - Sequência do ensaio de compressão axial simples.....	66
Figura 31 - Detalhe do rompimento do corpo de prova por compressão axial	66
Figura 32 - Sequência do ensaio de tração por compressão diametral	67
Figura 33 - Detalhe do rompimento de tração por compressão diametral.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações técnicas da fibra de aço utilizadas do trabalho segundo o fabricante.....	59
Tabela 2 - Especificações técnicas da fibra de polipropileno utilizadas do trabalho segundo o fabricante	60
Tabela 3 - Dosagem das fibras	63
Tabela 4 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo.....	69
Tabela 5 - Classificação granulométrica do agregado graúdo	70

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Relação água/cimento x resistência	20
Gráfico 2 - Influência do tamanho do agregado e teor de fibras na trabalhabilidade do CRF	36
Gráfico 3 - Tensão-deformação de compósitos com fibras	38
Gráfico 4 - Curvas de tensão-deformação de acordo com a forma das fibras com um volume de 1,73% de fibras de aço	39
Gráfico 5 - Carga-deflexão do CRF	41
Gráfico 6 - Comparação de curvas de tensão de cisalhamento entre concretos sem fibras e com fibras	42
Gráfico 7 - Curvas típicas de tensão-deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras	44
Gráfico 8 - Comportamento de compósitos reforçados em ensaios de tração na flexão com diferentes teores de fibras.....	46
Gráfico 9 - Diagrama de tensão x deformação elástica.....	48
Gráfico 10 - Resultados dos ensaios de compressão axial.....	71
Gráfico 11 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral	72
Gráfico 12 - Comparação dos resultados dos ensaios realizados.....	73

SUMÁRIO

1.0.	INTRODUÇÃO	14
2.0.	JUSTIFICATIVA.....	15
3.0.	OBJETIVOS.....	16
3.1.	Objetivo geral.....	16
3.2.	Objetivos específicos.....	16
4.0.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
4.1.	Concreto de Cimento <i>Portland</i>	17
4.2.	Agregados.....	18
4.2.1.	Agregados miúdos	19
4.2.2.	Agregados graúdos.....	19
4.3.	Relação água/cimento.....	20
4.4.	Fibras utilizadas em concretos	21
4.4.1.	Conceito de fibra	21
4.4.1.1.	Principais tipos de fibras.....	22
4.4.2.	Concreto reforçado com fibras (CRF)	30
4.4.2.1.	Mecanismo de transferência de tensão do concreto para as fibras ..	33
4.4.3.	Propriedades dos concretos reforçados com fibras.....	35
4.4.3.1.	Trabalhabilidade.....	35
4.4.3.2.	Resistência à compressão	37
4.4.3.3.	Resistência à tração.....	39
4.4.3.4.	Resistência de flexão	40
4.4.3.5.	Resistência ao cisalhamento	42
4.4.3.6.	Fadiga.....	43
4.4.4.	Aspectos que influenciam o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras.....	43
4.4.4.1.	Teor de fibra.....	43
4.4.4.2.	Fator de forma	44
4.4.4.3.	Volume crítico.....	45
4.4.4.4.	Comprimento crítico	46
4.4.4.5.	Módulo de elasticidade das fibras	48
4.4.4.6.	Distribuição e ancoragem das fibras.....	49
4.4.4.7.	Considerações práticas	50

4.4.5.	Dosagem do CRF.....	51
4.4.5.1.	Dosagem da matriz cimentícia	52
4.4.5.2.	Dosagem das fibras	52
4.4.6.	Aplicações do CRF	53
5.0.	MATERIAIS E MÉTODOS	56
5.1.	Materiais.....	57
5.2.	Métodos.....	62
6.0.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
6.1.	Resultados dos ensaios dos agregados	69
6.2.	Ensaio mecânico do concreto.....	70
6.2.1.	Resistência à compressão axial simples	70
6.2.2.	Resistência à tração por compressão diametral	71
6.2.3.	Comparação entre os resultados dos ensaios realizados.....	73
7.0.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULOS DO TRAÇO PARA CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	78
	APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULOS DA TRANSFORMAÇÃO DO TRAÇO UNITÁRIO EM QUILOGRAMAS	82
	APÊNDICE C – REPRESENTAÇÃO DAS TABELAS	84
	ANEXO A – TABELAS UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS DO TRAÇO UNITÁRIO.....	86

1.0. INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais utilizado no mundo depois da água. Devido à sua versatilidade, pode ser empregado em diversos tipos de estruturas, tendo custo relativamente baixo, e facilidade de moldá-lo com infinitas variações de formas. (HELENE, 2010).

Mesmo com tantos atributos, o concreto apresenta-se como um material frágil, apresenta algumas limitações como baixa resistência quando submetido à esforços de tração. Para tanto, ao longo do último século, com o avanço de novas tecnologias por parte da construção civil, busca-se atenuar as limitações do material. O uso de fibras como reforço do concreto, é uma alternativa, que se baseia na junção de elementos fibrosos dispersos na matriz cimentícia. A técnica propõe um concreto com características mecânicas mais elevadas, aumento da capacidade de deformação do compósito, e limitação do aparecimento de fissuras por parte do material.

No mercado atual, encontramos diversos tipos de fibras que podem ser associadas às matrizes cimentícias, como fibras de aço, vidro, carbono, polipropileno, dentre outras, que agregam ao material diferentes características, estes dependentes do tipo de fibra, e suas propriedades.

O concreto reforçado com fibras ainda é pouco explorado. Realizar estudos que viabilizem o uso do material pode intensificar ainda mais a utilidade do concreto. Analisar compostos fibrosos é um procedimento que necessita de estudos específicos da área e que pode esclarecer a real eficácia da adição de fibras ao concreto.

2.0. JUSTIFICATIVA

Ultimamente vêm surgindo concretos especiais, esses que objetivam melhorar algumas limitações do concreto convencional. O concreto reforçado com fibras é um concreto especial, compreendido como um compósito, de pasta de cimento, agregados e fibras dispersas aleatoriamente.

O compósito vem sendo estudado ao longo dos anos, e tem a finalidade de melhorar a resistência à tração do concreto convencional, amenizar o surgimento de fissuras por retração plástica e aumentar a tenacidade do material. Acredita-se que, o concreto em conjunto com as fibras, pode possibilitar novas aplicações ainda não superadas com o concreto comum.

Para tanto, é pertinente a realização do presente estudo, uma vez que pretende-se averiguar o comportamento do concreto reforçado com fibras, a dosagem adequada de fibra para se atingir um desempenho satisfatório do compósito e constatar a real contribuição das fibras na matriz cimentícia.

3.0. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho do concreto de Cimento *Portland* com a adição de fibras.

3.2. Objetivos específicos

- Analisar os diversos tipos de fibras a fim de compreender as propriedades das mesmas;
- Comparar por meio de ensaios laboratoriais o concreto com adição de fibras e o concreto comum, levando em consideração as principais propriedades;
- Analisar a potencialidade da adição das fibras metálicas e polipropileno;
- Identificar vantagens e desvantagens na adição de fibras.

4.0. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. Concreto de Cimento *Portland*

O concreto de cimento *Portland* é uma combinação de agregados (areia e pedra britada), o aglomerante cimento *Portland* e água. (ADÃO; HEMERLY, 2010).

Devido às suas inúmeras potencialidades têm uso largo na construção civil. Foi descoberto no fim do século XIX e teve seu uso mais intenso no século XX. É o material mais consumido pelo homem depois da água, e com sua descoberta facilitou projetar e construir grandes estruturas. (HELENE, 2010).

Ainda segundo Helene (2010), o concreto no seu estado fresco possui homogeneidade e trabalhabilidade, sendo fácil moldá-lo a qualquer forma e tamanho. E ainda de acordo com o autor considerado em seu estado endurecido possui resistência à compressão e em menor escala possui também resistência à tração.

De acordo com Sant'ana (2005), o uso do concreto tem se intensificado tanto nos últimos anos devido às suas inúmeras vantagens, e principalmente ao seu baixo custo.

Conforme Pimenta (2012), a produção completa do concreto passa por diversas operações, como:

- Mistura dos materiais: que é a preparação da massa homogênea, obtida através de trabalho manual ou mecânico;
- Dosagem: que consiste na designação da quantidade de cada material constituinte do composto;
- Lançamento do concreto: executado logo após a mistura;
- Adensamento: definido como processo de moldagem em formas, ainda no estado fresco;

- Cura: designada como etapa em que ocorre hidratação do cimento, e consiste em controlar a temperatura e a saída e entrada de umidade no concreto.

A boa execução e controle desses processos podem garantir um concreto altamente durável que depois de endurecido resiste aos esforços de carregamentos a ele submetidos.

4.2. Agregados

De acordo com Petrucci (1998), pode-se definir agregado como material granular sem forma e volume definidos. Suas dimensões são definidas e adequadas para cada obra de engenharia.

Segundo Romano (2004), os agregados podem ser classificados quanto à origem, às dimensões, e à massa unitária.

Conforme a NBR 7211/2009 (Agregados para concreto – Especificações), os agregados podem ser de origem natural, resultantes da fragmentação ou britagem das rochas.

Existem ainda agregados artificiais, resultantes de processos industriais que englobam alteração mineralógica, química ou físico-química, e além destes há também os reciclados provenientes de rejeitos industriais, mineração, construção ou demolição da construção civil. (NBR 9935/2011-Agregados – Terminologia).

Os agregados apresentam papel importante no concreto, atua de forma benéfica sobre propriedades como retração, resistência ao desgaste, entre outros, sem alterar a resistência mecânica. (ROMANO, 2004).

De acordo com Andolfato (2002), têm sentido econômico no concreto, já que constituem de 60% a 80% do compósito e são mais baratos que a pasta (cimento e água). Como apresentam elevada quantidade no concreto, a escolha destes deve atender a três condições:

- Possuir resistência à compressão e ao desgaste;
- Serem graduados, para reduzir o volume de pasta;

- Ser estáveis.

As dimensões dos agregados usados na confecção do concreto variam entre 10mm a 50mm, sendo 20mm um valor dominante, e a determinação das dimensões destes dá-se o nome de granulometria, que divide os agregados em dois grupos: agregados miúdos e agregados graúdos. (NEVILLE; BROOKS, 2010).

4.2.1. Agregados miúdos

Conforme a NBR 9935/2011 – Agregados–Terminologia, os agregados miúdos são assim classificados quando no máximo 15% dos grãos fiquem retidos na peneira de malha 4,75mm.

Ainda segundo a norma referida acima, a areia é considerado agregado miúdo (desde que atenda as especificações de granulometria), é proveniente de processos naturais ou artificiais de desintegração das rochas.

De acordo com Andolfato (2002), as areias podem ser divididas em grossas, médias, finas e muito finas conforme seu valor do módulo de finura, que consisti no somatório das porcentagens retidas na peneira especificada pela norma, dividido por 100.

4.2.2. Agregados Graúdos

Define-se agregados graúdos, pedregulho ou britas de rochas estáveis, e que no máximo 15% dos grãos passem na peneira de malha de 4,75mm. (NBR 9935 – Agregados - Terminologia).

Conforme Petrucci (1998), agregados graúdos podem ser pedregulhos naturais, seixo rolado, pedra britada, e devem ser oriundos de rochas inalteráveis sob a ação do ar, água ou gelo. Agregados de rochas feldspáticas ou de xisto

devem ser rejeitados.

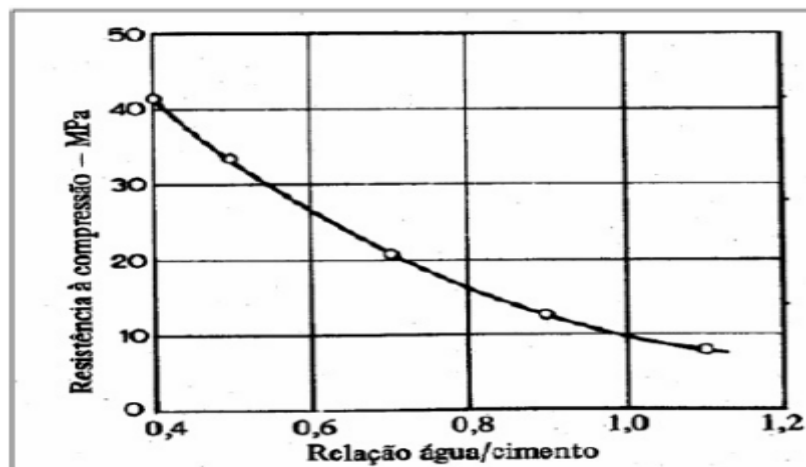
4.3. Relação água/cimento

A relação água/cimento é a quantidade de água da mistura medida em relação à massa de cimento utilizados na dosagem, é o fator de maior influência na resistência do concreto. Os dois materiais devem ser dosados corretamente para assegurar a durabilidade dos concretos. (ROMANO, 2004).

A mistura de água e cimento dá-se o nome de pasta, que em estado fresco aglomera os agregados, confere impermeabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

A quantidade de água adicionada ao cimento é relativamente pouca, entretanto acrescenta-se um pouco mais para obter-se maior trabalhabilidade com a pasta, contudo a adição de água interfere na resistência do concreto, sendo essencial dosar uma proporção ideal entre água e cimento, para que se mantenha um concreto de qualidade. (ANDOLFATO, 2002). (Gráf. 1).

Gráfico 1 - Relação água/cimento x resistência



Fonte: Branco e Pieretti (2012)

4.4. Fibras utilizadas em concretos

Devido ao avanço tecnológico da construção civil existem hoje os concretos especiais que buscam minorar as deficiências do concreto convencional e vêm sendo usado cada vez mais em construções que requerem um concreto de maior resistência. Dentro desse quadro o uso de fibras no concreto tem aumentado, especialmente para combater a fissuração de estruturas em concreto por retração plástica. (FIGUEIREDO; TANESI; NINCE, 2002).

As fibras associadas ao concreto são distribuídas aleatoriamente, têm a função de reforço do concreto seja por ação de cargas externas, mudança na umidade do meio ambiente ou temperatura. O compósito pode ser usado em pisos, concretos projetados, pré-moldados e demais aplicações. (WATANABE, 2008).

Conforme Guimarães (2010), as fibras interagem com a matriz cimentícia de forma que elas absorvem a energia que a matriz não é capaz de absorver. Há também um grande aumento de deformação em compósitos fibrosos quando comparados ao concreto convencional.

As fibras utilizadas para reforço da matriz cimentícia, passaram por desenvolvimento tecnológico desde o início de seu uso, buscando propiciar uma melhor aderência entre o aditivo e a matriz. Hoje encontramos fibras curtas, longas, retas, onduladas, com gancho nas extremidades, coladas em feixe, etc. (VASCONCELOS, 2012).

4.4.1. Conceito de Fibra

Caracteriza-se fibra como material fino e alongado. Encontramos fibras naturais que estão dispostas na natureza, artificiais que são desenvolvidas pelo homem através de materiais naturais e as fibras sintéticas que também são feitas pelo homem, porém de origens químicas. (JÚNIOR; ROCHA, 2011).

Segundo Figueiredo (2011), fibras são partículas descontínuas destinadas ao reforço do concreto onde se têm que seu comprimento é maior que sua seção transversal.

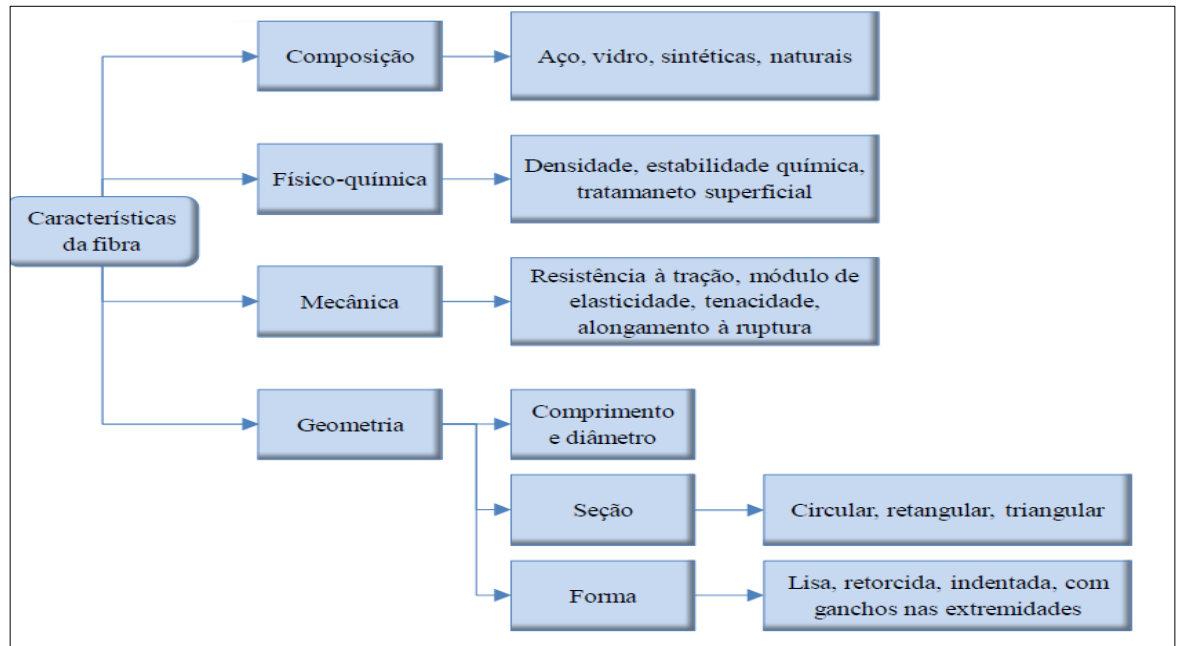
De acordo com Vasconcelos (2012), o comprimento das fibras é um parâmetro importante para avaliar a atuação destas no compósito, esse se caracteriza pela distância entre suas extremidades. O diâmetro é estabelecido de acordo com sua seção transversal, essa que pode se apresentar de forma retangular, circular ou variada.

4.4.1.1. Principais tipos de fibras

De acordo com o tamanho das fibras essas podem ser divididas em macro e microfibras. As microfibras podem impedir microfissuras e tem diâmetros variando em um intervalo de poucas dezenas de micrômetros. As macrofibras possuem diâmetros na faixa de 0,2 a 1 milímetro. Os valores de módulo de elasticidade, resistência à tração e capacidade de alongamentos são definidos em função do material constituinte da fibra. (VASCONCELOS, 2012).

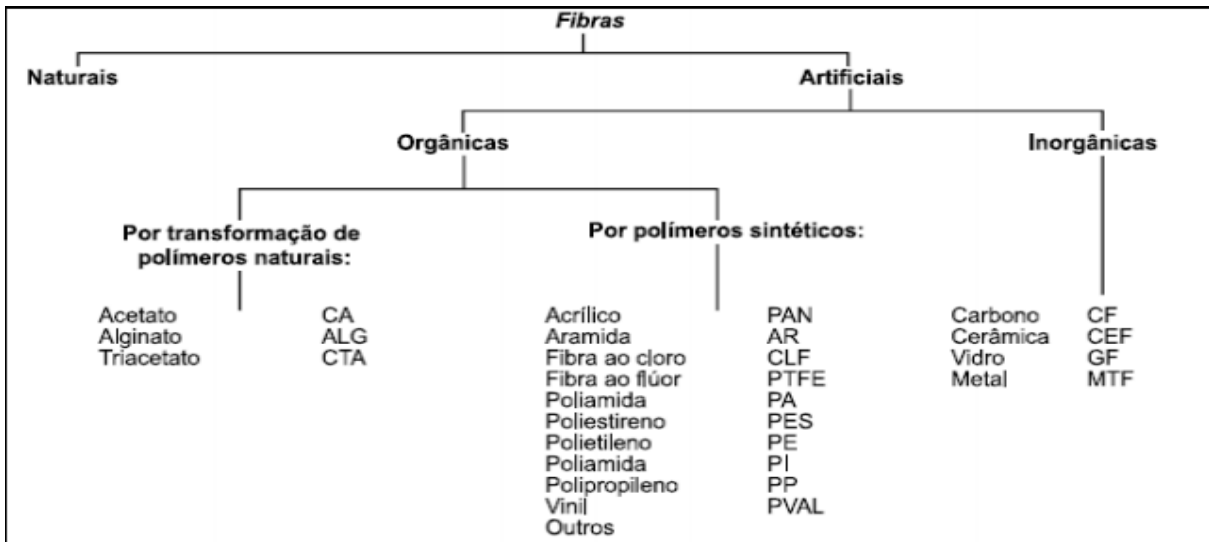
Além do material constituinte de cada tipo de fibra, as propriedades físico-químicas que também devem ser observadas são: densidade, rugosidade superficial, estabilidade química, resistência ao fogo, entre outras. Com relação às propriedades de geometria, são levadas em consideração o comprimento, seção da fibra e perfil longitudinal. Além das citadas, as características mecânicas são notavelmente importantes tais como: resistência à tração, ductilidade, rigidez, módulo de elasticidade e módulo de ruptura. (VASCONCELOS, 2012). (FIG.1).

Figura 1 – Características de interesse das fibras para matrizes cimentícias



Fonte: Naaman (2000)

Há uma vasta gama de tipos de fibras. Encontramos fibras de origem natural, metálicas e sintéticas. As fibras naturais estão dispostas na natureza e classificadas segundo o BISFA como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Classificação das fibras segunda BISFA¹

Fonte: Manual técnico Maccaferri

As fibras naturais foram as pioneiras á serem empregadas em obras de terra. São obtidas de materiais como: bambu, coco, linho, celulose, cana de açúcar etc. Algumas podem alcançar grandes resistências de valores superiores a 100 Mpa, como as fibras de bambu. No entanto fibras de origem vegetal podem interferir na durabilidade dos compósitos, devido à degradação natural ocasionada por fungos. (WANATABE, 2008).

Fibras de amianto e celulose são naturais e matérias-primas para obtenção de materiais de revestimento na construção civil. (FIG. 3 e 4).

¹BISFA – International Bureau for the Standardisation of Man Made Fibres.

Figura 3 – Fibra de celulose



Fonte: Júnior; Rocha (2011)

Figura 4 – Fibra de amianto



Fonte: Júnior; Rocha (2011)

Segundo Júnior e Rocha (2011), as fibras naturais existem em grande abundância, tem baixo custo, não prejudica a saúde, são menos densas, são biodegradáveis, e possuem propriedades de conservar energia, porém quanto ao reforço de matrizes cimentícias, apresentam problemas na durabilidade, devido à falta de estabilidade dimensional e a fácil degradação em presença de umidade em pouco tempo.

Na categoria das fibras orgânicas, provenientes de transformação de polímeros sintéticos, temos as fibras de polipropileno, poliestireno, acrílico, aramida, dentre outras, sendo as fibras de polipropileno muito utilizadas no reforço do concreto. (FIG. 5).

Figura 5 – Fibra de polipropileno



Fonte: Júnior; Rocha (2011)

As fibras sintéticas caracterizam-se por baixo módulo de elasticidade, baixo custo, grande deformação, baixa resistência ao fogo e aderência restringida à matriz do concreto. (RESENDE, 2003).

De acordo com Castro (2010), fibras de polipropileno são normalmente empregadas às matrizes de concreto com a intenção do controle de micro fissuração no período de endurecimento do concreto.

O polipropileno é derivado de uma resina termoplástica, oriunda de um gás propileno que é um subproduto da refinação do petróleo. A massa da fibra de polipropilenos é 8 vezes maior que a das fibras de aço, possuem resistência ao fogo, à corrosão e tem menor densidade dentre os termoplásticos comuns, são flexíveis e não retém água. (MOSCATELLI, 2011).

Conforme Donato (2007), as fibras de polipropileno são de origem polimérica, constituída de um material termoplástico (material que adquire uma consistência plástica com aumento de temperatura). Como um polímero termoplástico, o polipropileno é formado por cadeias de moléculas polimerizadas. O polipropileno possui baixa densidade, baixo módulo de elasticidade e resistência à tração de aproximadamente 400MPa. Quando esse tipo de fibra é associado à matriz cimentícia, confere uma substancial resistência a impactos.

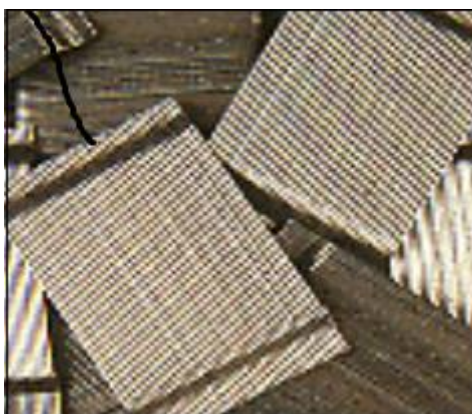
As fibras de polipropileno possuem boa capacidade de deformação, baixo módulo de elasticidade, alta durabilidade no meio alcalino e baixo custo. Sua resistência à tração é relativamente pequena quando comparada à de outras fibras,

podendo não ter melhorias satisfatórias de resistência nesse aspecto quando associadas ao concreto. (SALVADOR, 2013).

Encontramos fibras de polipropileno de duas formas: em monofilamentos ou fibriladas. As chamadas de monofilamentos são fios cortados em um comprimento padrão, já as fibriladas consistem em uma malha de finos filamentos de seção retangular. O uso desse tipo de fibra para o aumento de resistência do compósito é menos frequente, já que para ter esse ganho de resistência o teor de fibras deve ser grande o suficiente para que haja o aumento da capacidade resistente do compósito após o aparecimento da fissuração na matriz. As fibras de polipropileno não substituem a armadura principal de barras de aço. (FIGUEIREDO; TANESI;NINCE, 2002).

Segundo Júnior e Rocha (2011), o grupo das fibras artificiais é dividido entre fibras orgânicas e fibras inorgânicas. No conjunto das inorgânicas temos fibras de carbono, cerâmica, vidro e metal. As fibras metálicas têm grande diversidade de formatos e dimensões são conceituadas como fibras de alto módulo já que atuam no reforço estrutural do concreto. (FIG. 6 e FIG.7).

Figura 6 – Fibras metálicas coladas em forma de pentes



Fonte: Júnior; Rocha (2011)

Figura 7 – Fibras metálicas de extremidades deformadas e soltas



Fonte: Salvador (2013)

As fibras de aço são elementos descontínuos muito utilizados e atuam como reforço do concreto. O seu comprimento prevalece sobre o seu diâmetro, pode ter superfície lisa ou corrugada e formas retilíneas ou com ancoragem nas extremidades. (SARZALEJO et al., 2009).

Fibras de aço são as mais usadas em concretos com a finalidade de se ganhar tenacidade, resistência a flexão, resistência ao impacto e fadiga, e principalmente a minimização e controle de fissuração do composto. Esse tipo de fibra pode substituir a armadura tradicional em pisos, pavimentos industriais, túneis e taludes. (CASTRO, 2010).

Conforme Garcez (2005), as fibras metálicas costuram as fissuras em uma peça de concreto, modificam o modo de ruptura do material, conferindo um material mais dúctil no regime pós-pico de carregamento.

Ainda segundo o autor considerado, fibras metálicas com ancoragem nas extremidades propiciam um mecanismo de transferência de tensão entre as faces das fissuras, garantindo ao compósito uma maior resistência para suportar cargas em níveis de deslocamento superiores àqueles da matriz não reforçada com fibras.

A utilização desse tipo de fibra no Brasil já conta com uma normalização técnica que é a NBR 15530 (2007) – Fibras de aço para concreto – Especificação,


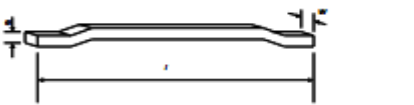
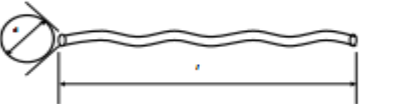
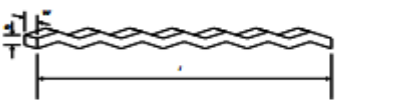
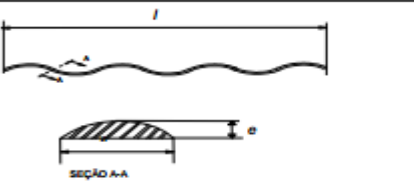
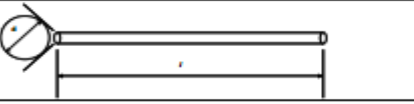
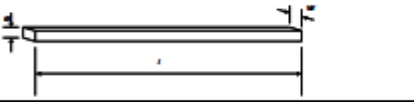
que apresenta uma divisão das fibras de aço relacionando-as aos requisitos e tolerância das mesmas. Em função da geometria das fibras há três grupos:

- Tipo A: fibra de aço com ancoragem nas extremidades
- Tipo C: fibra de aço corrugada
- Tipo R: fibra de aço reta

De acordo com a configuração geométrica referida há ainda três classes segundo a norma, definidas segundo o aço que as deu origem, se é trefilado ou laminado:(FIG. 8).

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

Figura 8 – Classificação e geometria das fibras de aço

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

Fonte: NBR 15530

Conforme Castro (2010), encontramos esse tipo de fibra de seção transversal circular com diâmetros entre 0,25 mm a 1 mm, e comprimento de 10 mm a 75 mm. As achatadas com diâmetro de seção transversal entre 0,15 mm a 0,41 mm, e largura variando de 0,25 mm a 0,90 mm. Com o intuito de facilitar a mistura das fibras no concreto e manuseio do composto, essas podem ser coladas umas as outras com colas solúveis em água, agrupando feixes de 10 a 30 fibras.

Fibras de aço para concreto passaram a ser utilizadas no Brasil, a partir de 1990. O país também tem recordes de construção de pisos industriais e prêmios internacionais de qualidade. Muitos estudos já foram feitos para o aperfeiçoamento da técnica. Geralmente são utilizadas dosagens de 15 a 40 kg/m³ de concreto, dependendo do tipo de obra e a resistência requisitada pela mesma. (FIGUEIRED, 2010).

Um aspecto importante quanto às fibras de aço, é a possível deterioração por corrosão das fibras mais próximas à superfície do concreto, onde o cobrimento é menor, e como consequência disso uma redução de seus diâmetros, desencadeando decréscimos de resistência do compósito. Contudo, estudos realizados em laboratórios expondo o CRFA (concreto reforçado com fibras de aço) à presença de cloretos indicam que as consequências por corrosão não são tão significativas já que a entrada de agentes agressivos é limitada e a alcalinidade das matrizes cimentícias é capaz de defender a maioria das fibras. No entanto, em situações extremas de fissuração há uma grande possibilidade de corrosão generalizada e nesse caso se ter cuidado. (GARCEZ, 2005).

4.4.2. Concreto reforçado com fibras (CRF)

Apesar de o concreto ser o material de construção mais utilizado sabe-se que ele apresenta algumas características que limitam sua utilização. Um dos problemas do compósito é seu peso próprio (25 KN/m³) que dificulta dimensionar estruturas de grandes vãos, mas a principal deficiência desse material é sua baixa resistência aos

esforços de tração estando seu valor normalmente entre 0,7 e 0,11 da sua resistência à compressão. (SANT'ANA, 2005).

De maneira geral, o concreto convencional se apresenta como um material frágil devido à sua baixa resistência à tração o que resulta na sua pequena capacidade de deformação. Tal deficiência do composto o leva a apresentar fissuras quando o material é solicitado à tração. (SANT'ANA, 2005).

Para melhorar tal limitação do material estuda-se desde 1960 a utilização de fibras para reforço desse composto. Numa fase de desenvolvimento tecnológico que se propaga até os dias de hoje, verifica-se através de ensaios a real contribuição da presença de fibras no concreto. (SANT'ANA, 2005).

O principal motivo de se associar fibras ao concreto é controlar a fissuração do material, especialmente em sua fase de retração plástica que é um fenômeno físico e químico inevitável no concreto.

A retração plástica se dá principalmente pela perda de água da pasta de cimento para o ambiente, formando-se meniscos capilares que geram pressões negativas que acarretam contração volumétrica da pasta. Quando esta contração é delimitada, seja por agregados de maiores dimensões ou pela própria armadura do concreto, ocasionará tensões de tração e com isso formação de fissuras. (NUNES, 2006).

Segundo Júnior e Rocha (2011), o fenômeno citado anteriormente se divide em três principais fases, essas dependendo obviamente das fases específicas do concreto. Na primeira fase, conhecida como assentamento plástico ou exsudação, ocorre quando a água do concreto ainda não foi evaporada, as partículas do concreto envolvidas na água se assentam e a água tende a percolar até a superfície do composto. Já a segunda fase, chamada de retração plástica primária, caracteriza-se pelo surgimento das fissuras, isso acontece quando o concreto começa a endurecer. E a terceira e última fase conhecida como autógena, se dá quando a hidratação do cimento se desenvolve, os produtos formados aglomeram os agregados, mantendo-os unidos e assim os níveis de poros, o assentamento plástico e a retração plástica primária decrescem. A FIG. 9 apresenta uma fissura causada por retração plástica.

Figura 9 – Concreto com fissuras por retração



Fonte: Manual Técnico Maccaferri

Segundo Mehta; Monteiro² (1994, apud GARCEZ, 2005), o concreto convencional pode apresentar fissuras na zona de transição entre a matriz cimentícia e os agregados antes mesmo de ser submetido a tensões externas, e é pequena a quantidade de energia necessária para a propagação da fissuração.

Com o objetivo de amenizar a ocorrência de fissuras no concreto, assim como ter maior suporte à fadiga, impacto e durabilidade, a junção de concreto e fibras tem mostrado resultados satisfatórios na atenuação desses aspectos.

Todos os concretos sejam eles plásticos, fluidos ou secos, podem ser reforçados com fibras porém, devem ser observados os princípios tecnológicos básicos para que se tenha um ganho considerável de desempenho do material no concreto, além disso, a adição de fibras tem sempre uma ação de aumento no custo unitário do concreto. (FIGUEIREDO, 2011).

²MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

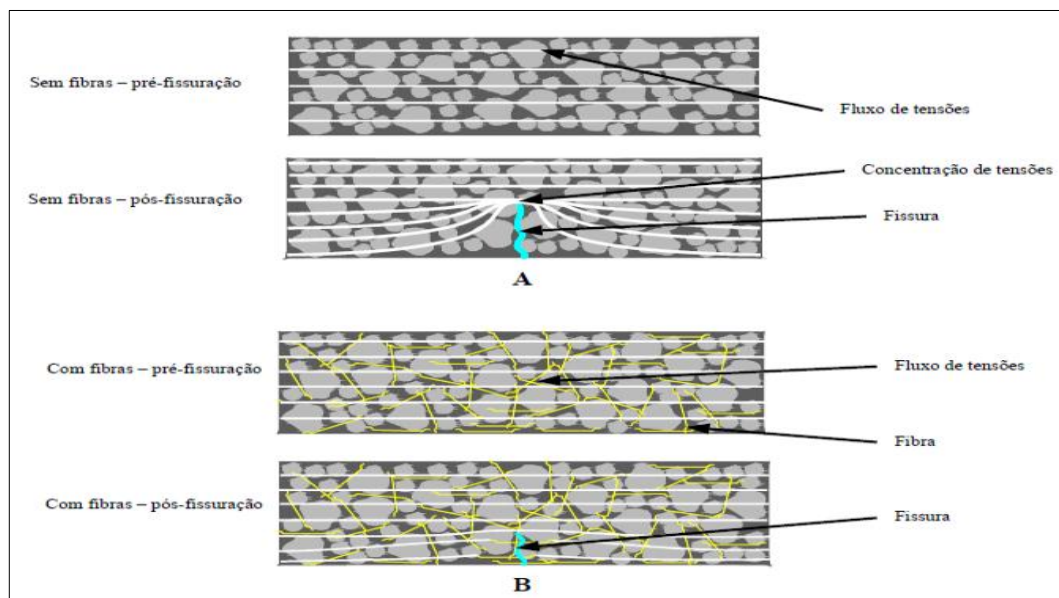
4.4.2.1. Mecanismo de transferência de tensão do concreto para as fibras

A pequena resistência do concreto à tração pode ser associada, a sua dificuldade de interromper a propagação de fissuras quando solicitado a esse tipo de esforço.

Estando o concreto submetido á esforços de tração o mesmo apresentará fissuras como um escudo para a dissipação desta força, desse modo, as tensões são desviadas dessas descontinuidades e se concentram nas extremidades das fissuras, então caso a matriz do compósito resistir à estas tensões não ocorrerá o rompimento do material, mas se a matriz não suportar, se manifestaram novas fissuras que se acumularão e levarão ao rompimento do compósito. (JÚNIOR; ROCHA, 2011).

A real contribuição das fibras no concreto é desempenhar o papel de uma ponte de transferência de tensões após a fissuração da matriz e assim minimizar a concentração de tensões nas suas extremidades como mostra a FIG. 10.

Figura 10 – Esquema de concentração de tensões no concreto: A - sem adição de fibras; B – com adição de fibras



Fonte: Figueiredo (2000)

A presença de fibras no concreto o torna um material de comportamento pseudodúctil por apresentar capacidade de resistir à ruptura após a fissuração. Sob a atuação de tensões, o concreto tem uma capacidade de deformação maior, inclusive após o aparecimento de fissuras sobre sua superfície. (JÚNIOR; ROCHA, 2011).

Uma particularidade do CRF (concreto reforçado com fibras) é o fato das fibras serem dispostas no concreto de forma aleatória reforçando toda a peça, diferentemente das peças com armaduras convencionais que se dispõem em apenas uma posição. (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo Figueiredo (2000), o volume crítico do CRF se dá pelo teor de fibras necessárias para garantir a resistência após o rompimento da matriz. Quando o volume de fibras está acima do volume crítico o material pode suportar graus crescentes de carregamento, até depois de aparecer a primeira fissura, porém quando o volume de fibras está abaixo do crítico há uma perda de carga que o compósito tem capacidade de suportar.

Um fator importante no bom desempenho do concreto reforçado com fibras é a boa interação entre a matriz e as fibras que depende de aspectos como atrito entre a fibra e a matriz, ancoragem do aditivo na matriz e a dimensão dos agregados, lembrando que estes aspectos são diretamente influenciados pelas características das próprias fibras. Entender esta relação permite estimar a verdadeira contribuição das fibras no compósito e até prever seu comportamento. (CASTRO, 2010).

De acordo com Garcez (2005), as fibras combinadas ao concreto fazem com que o material compósito precise de mais energia para que ocorra a abertura e propagação das fissuras, proporcionando um ganho efetivo de tenacidade, uma vez que as fibras atuam como forças de impedimento de fissuras causadas sejam por retração plástica ou pelas tensões impostas à estrutura.

4.4.3. Propriedades dos Concretos Reforçados com fibras

O concreto reforçado com fibras possui algumas características específicas, que serão apresentadas a seguir.

4.4.3.1. Trabalhabilidade

Como a mistura das fibras no concreto é feita ainda no seu estado fresco, ao acrescentar tal aditivo no composto o mesmo será consistente e terá menos mobilidade, condições que conseqüentemente afetarão sua trabalhabilidade.

De acordo com Metha e Monteiro³ (1994 apud CORÓ, 2002, p. 16), a diminuição da trabalhabilidade do material independe do tipo de fibra, essa perda é proporcional ao volume de fibras no concreto.

Dois fatores têm maior influência na perda de trabalhabilidade. O primeiro é que fibras de dimensões maiores reduzem a mobilidade das partículas, principalmente dos agregados de maiores dimensões, gerando um maior contato entre os materiais constituintes, aumentando o atrito entre eles e diminuindo a fluidez da mistura. O segundo fator de maior influência está ligado na área superficial das fibras. Ao adicionar fibras no concreto, aumenta-se a área superficial e conseqüentemente a quantidade de água na mistura, o que gera aumento de coesão e perda da mobilidade do compósito. (FIGUEIREDO, 2011).

A perda de trabalhabilidade pode ser maior para concretos reforçados com fibras de maior rigidez, especialmente nos casos de concretos projetados e bombeados.

Há dois métodos distintos de medição da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras. O cone invertido é um método em que se mede a fluidez da

³ MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

mistura, expondo-a a vibrações e é necessário que a mesma escoe por um cone invertido. O segundo ensaio é o Vebe, considerado o mais adequado, desenvolvido por um engenheiro sueco VebeBährner, que consiste em uma mesa vibratória, um recipiente circular, um tronco de cone e um disco de vidro ou plástico com movimento livre. O ensaio se dá com a colocação do tronco de cone no concreto, daí a vibração é ativada. Quando o CRF é moldado de forma tronco-cônica para a cilíndrica, aí se mede sua consistência também conhecida como índice de Vebe.(FIGUEIREDO, 2011) (FIG. 11).

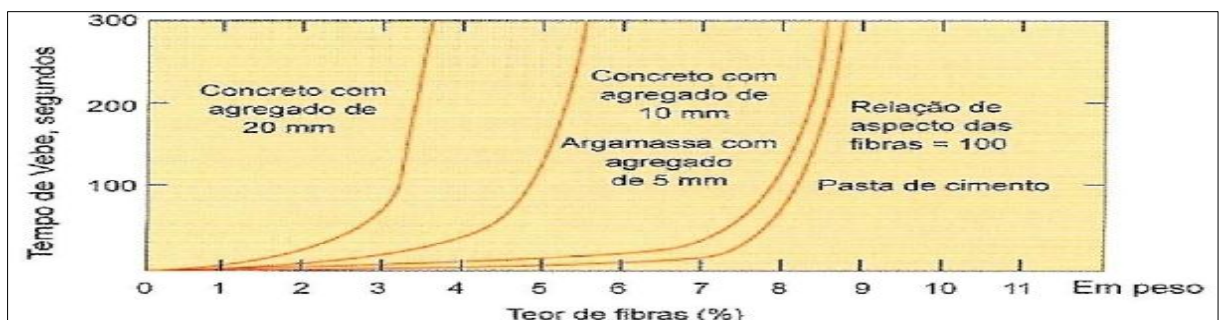
Figura 11 – Ensaio de avaliação de trabalhabilidade Vebe



Fonte: Lopes (2005).

Quanto maior o índice Vebe menor a trabalhabilidade do concreto. Alguns fatores podem influenciar na medição dessa propriedade, como o tamanho do agregado e o teor de fibras. (GRAF. 2).

Gráfico 2 - Influência do tamanho do agregado e teor de fibras na trabalhabilidade do CRF



Fonte: (Metha; Monteiro, 1994, apud Castro, 2010).

De acordo com o gráfico representado acima, percebemos que na medida em que o teor de fibras aumenta, para dois agregados diferentes, aumenta o tempo de compactação no ensaio Vebe e este aumento será crescente diante de uma maior concentração de fibras.

Um problema que pode surgir na mistura de concreto e fibras é a formação dos chamados ouriços que são bolas formadas por fibras agrupadas, o que gera maior perda de trabalhabilidade principalmente nos casos de concretos bombeados. A formação desse tipo de elemento está ligada à mistura inadequada dos materiais. Ao acrescentar a fibra ao concreto recomenda-se lançá-las em quantidades controladas junto com os agregados. Para minimizar e evitar esse tipo de problema, uma alternativa é a utilização de fibras coladas em pentes. (FIGUEIREDO, 2011). (FIG.12).

Figura 12 – Ouriço formado por agrupamento de fibras no concreto.



Fonte: Figueiredo (2000).

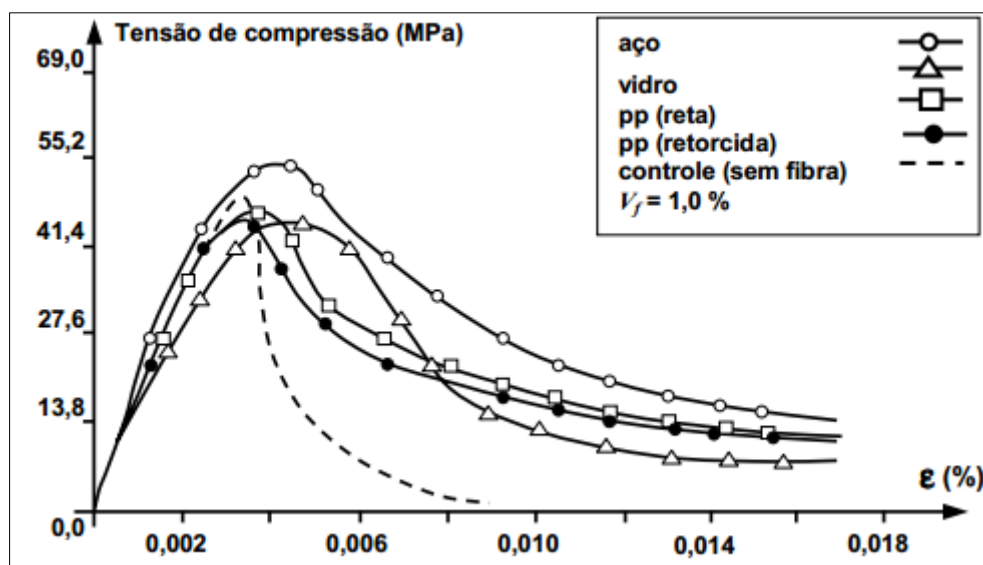
4.4.3.2. Resistência à compressão

Não é grande o aumento de resistência à compressão do concreto reforçado com fibras. Segundo Williamson⁴ (1974, apud SANT'ANA, 2005), as fibras aumentam em até 23% a resistência à compressão.

⁴WILLIAMSON, G. R. **Steel fibers as web reinforcement in reinforced concrete proceedings.** 1978.

No entanto, de acordo com alguns experimentos as fibras de aço podem produzir um aumento mais significativo referente à resistência à compressão, quando comparado com um concreto sem o aditivo ou com fibras de polipropileno e vidro. O Graf. 3 representa a influência de alguns tipos de fibras associadas á matrizes cimenticias apresentando em termos de tensão-deformação para compósitos com 1% de fibras.

Gráfico 3 - Tensão-deformação de compósitos com fibras



Fonte: Fanela; Naaman (1985).

A adição de fibras pode produzir nenhuma ou poucas alterações do compósito no seu estado elástico, porém pode surtir efeitos satisfatórios no seu comportamento pós-pico. No gráfico acima nota-se claramente uma declividade menos acentuada dos concretos reforçados com fibras em relação ao sem adição de fibras. Isso se deve ao seu ganho de tenacidade, ou seja, o CRF possui maior capacidade de absorver energia de deformação até sua ruptura. (SANT'ANA, 2005).

Para concretos reforçados com fibras de aço, a resistência à compressão é pouco afetada, os acréscimos de resistência podem atingir até 25% apenas. A adição dessas fibras leva a um incremento no comportamento pós-fissuração do compósito, gerando assim aumento de tenacidade do compósito. (GARCEZ, 2005).

4.4.3.3. Resistência à tração

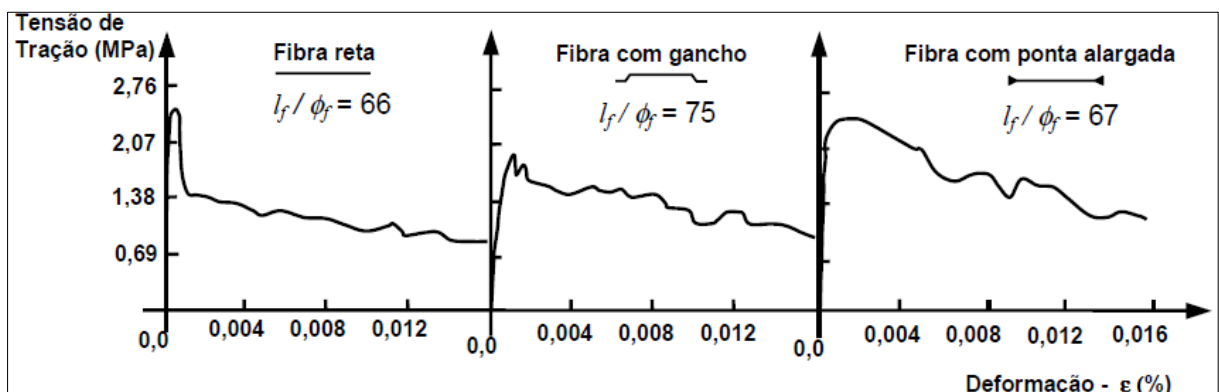
Estudos feitos por Bentur e Mindess (1990), evidenciaram que 5% de fibras de aço lisas e retas, dispostas na mesma direção de tração, geram um aumento de resistência à tração de até 113%, enquanto os mesmos tipos de fibras associadas ao concreto aleatoriamente, resultam num aumento de no máximo 60%. (CASTRO, 2010).

De acordo com Castro (2010), um aumento considerável de resistência à tração em concretos reforçados com fibras só é possível em situações consideráveis, como:

- Volumes maiores (acima de 2%).
- Fibras de alto módulo de elasticidade.
- Matriz com maior aderência às fibras.
- Fibras alinhadas na direção de tração.
- Processo de mistura adotado.

A ancoragem das fibras na matriz de concreto tem grande influencia nos compósitos quando são submetidos à esforços de tração, por isso, a forma das fibras se destaca nesse quesito. (GRAF. 4).

Gráfico 4 - Curvas de tensão-deformação de acordo com a forma das fibras com um volume de 1,73% de fibras de aço



Fonte: Sant'ana (2005).

Como a ancoragem é muito influenciada pela forma das fibras, a razão entre o seu comprimento e o diâmetro é dada por (l_f / ϕ_f) . Observa-se claramente que quanto melhor o mecanismo de ancoragem, maior a absorção de carga e aumento de deformação. (SANT'ANA, 2005).

4.4.3.4. Resistência de flexão

Segundo Johnston⁵(1974 apud SANT'ANA, 2005), a adição de fibras ao concreto resulta em um aumento de resistência à flexão maior até que compressão e tração.

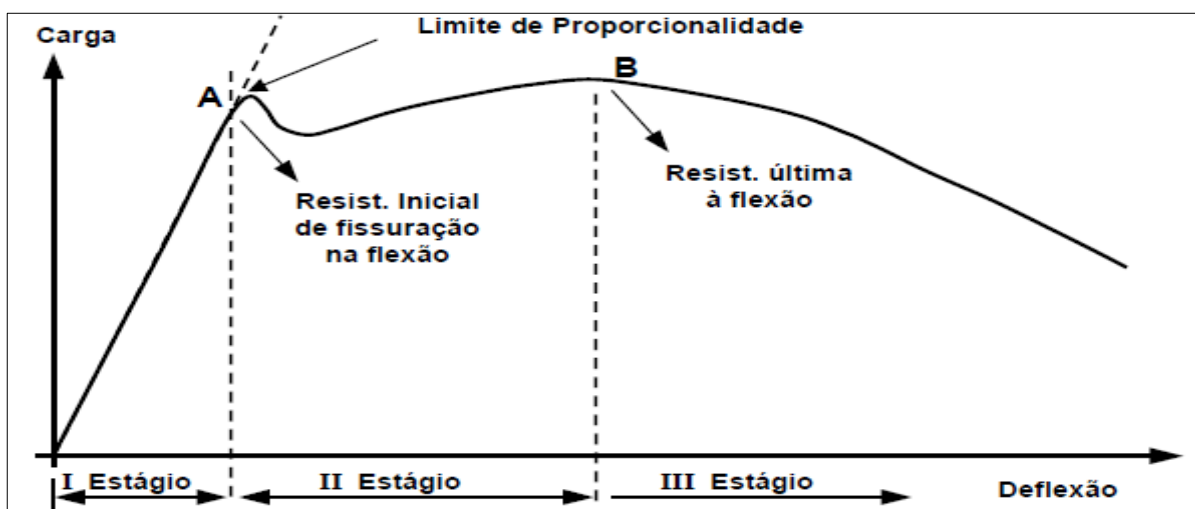
De acordo com Sant'ana (2005), o CFR sob flexão é influenciado por fatores como:

- Tipo de fibra.
- Volume de fibras.
- Orientação das fibras.
- Aderência das fibras.

Tais aspectos podem ser analisados em uma curva com carga de flexão x deflexão com amostras de concretos reforçados com fibras. (GRAF.5).

⁵JOHNSTON, C. D. **Steel fiber reinforced mortar and concrete**. 1974.

Gráfico 5 - Carga-deflexão do CRF



Fonte: Sant'na (2005).

O esquema acima se divide em três estágios, no primeiro estágio a carga aplicada é compartilhada entre matriz e as fibras, até atingir o limite de proporcionalidade, que é a resistência inicial de fissuração na flexão da matriz. O segundo estágio é caracterizado por uma transferência de tensão da matriz fissurada para as fibras, que é representado no esquema por um comportamento não linear. Com o aumento de cargas nas fibras, essas tendem a ser arrancadas gradativamente. No terceiro e último estágio, já com a matriz fissurada e o arrancamento das fibras, atinge-se a resistência última à flexão, daí a capacidade desse material suportar cargas de flexão vai diminuindo. (SANT'ANA, 2005).

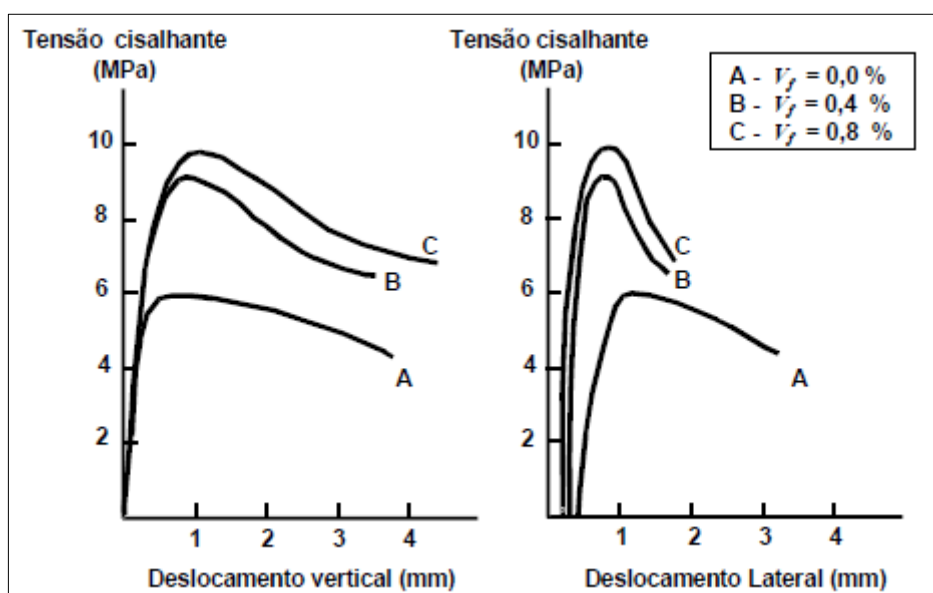
Segundo Garcez (2005), os resultados de ensaios de flexão em compósitos reforçados com fibras de aço, são bem superiores aos de resistência à compressão e à tração. Os valores chegam a ser de 50 a 70% maiores do que de um concreto não reforçado. Por melhor representar as situações em que o CRF é exposto, o ensaio mais utilizado para quantificação desse requisito é o ensaio de tração na flexão.

4.4.3.5. Resistência ao Cisalhamento

O aumento de resistência ao cisalhamento dos compósitos está associado à disposição das fibras na matriz cimentícia. Como as fibras proporcionam um reforço de espaçamento pequeno essas interceptam as fissuras formadas em todas as direções. (SANT'ANA, 2005).

Para verificar o desempenho das fibras no comportamento do concreto ao cisalhamento, Swamy (1987), propôs utilizar corpos de provas semelhantes, cilíndricos ou prismáticos, em ensaio de compressão. No resultado deste ensaio observa-se que na presença de fibras há um deslocamento lateral sensível dos corpos de prova, nota-se também que na medida em que o teor de fibras aumenta, o efeito das mesmas sobre o composto é amplificado. (SANT'ANA, 2005). (GRAF.6).

Gráfico 6 - Comparação de curvas de tensão de cisalhamento entre concretos sem fibras e com fibras



Fonte: Sant'ana (2005).

4.4.3.6. Fadiga

As fissuras em uma peça de concreto tendem a aumentar de acordo com os ciclos de carregamento, logo quanto mais próxima for a tensão máxima da resistência do material, menor será o número de ciclo de tensões necessários para ruptura. A ação de fibras de alto módulo e resistência no concreto aumentam o número de ciclos. Essa propriedade é muito importante, uma vez que aumentando o número de ciclos o CRF suporta maiores cargas dinâmicas. (FIGUEIREDO, 2011).

Para o concreto reforçado com fibras de aço, o mesmo terá uma resistência à fadiga cerca de 65% a 90% da resistência à flexão estática, isso dependendo do tipo de fibra e da sua concentração. A adição de fibras aumenta a vida útil de estruturas submetidas à fadiga e diminui a largura das fissuras. (GARCEZ, 2005)

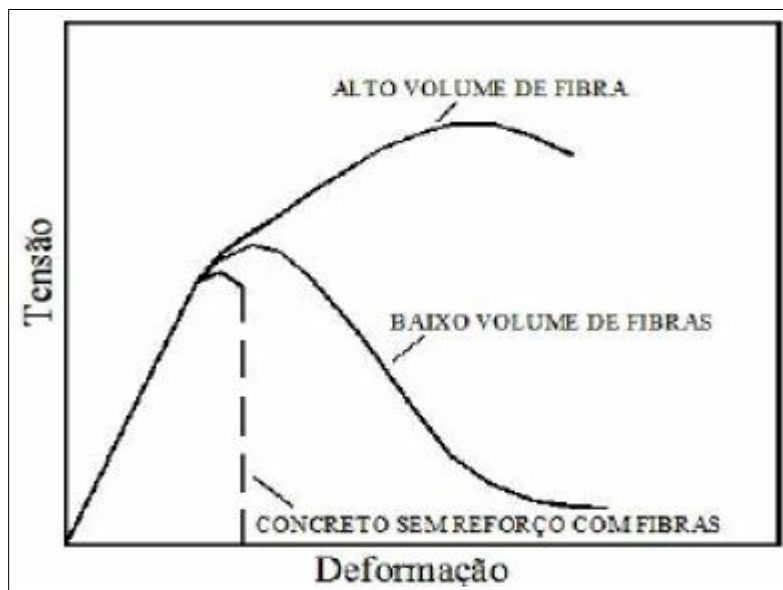
4.4.4. Aspectos que influenciam o comportamento mecânico do concreto reforçado com fibras

De uma maneira geral analisa-se o desempenho de compósitos reforçados com fibras de acordo principalmente com as características mecânicas que serão mencionadas a seguir.

4.4.4.1. Teor de fibra

A quantidade de fibras incorporadas ao concreto é um parâmetro de grande influência no desempenho final do compósito. Observa-se no GRAF. 7, como o aditivo no concreto pode modificar o gráfico de tensão-deformação. (GARCEZ, 2012).

Gráfico 7 - Curvas típicas de tensão-deformação para ausência, baixo e alto volume de fibras



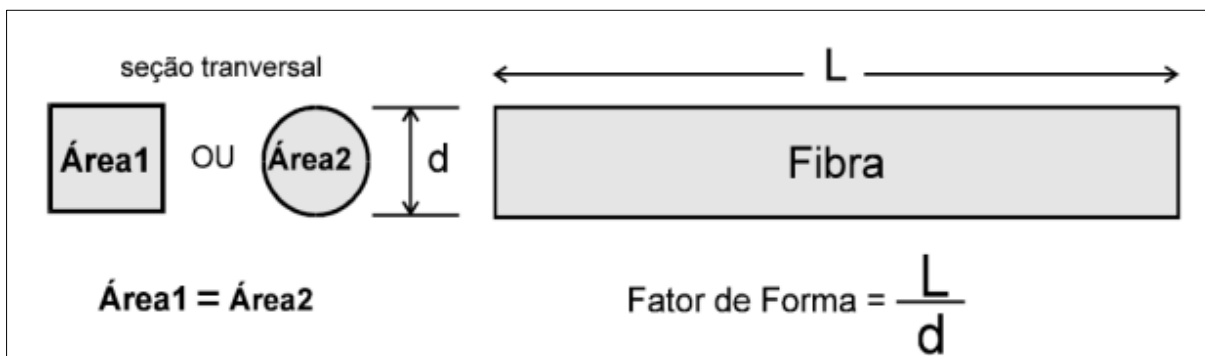
Fonte: (Bentur; Mindess, 1990, apud Garcez, 2005)

Baixos volumes de fibras resultam em alteração no comportamento plástico e na tenacidade dos concretos fibrosos na fase pós-fissuração, já altos teores de fibras condizem em melhoras significativas no comportamento estrutural do material, na fase pré-fissuração. Trabalhar com dosagens de altos teores de fibras, pode afetar a mobilidade do material, para isso pode-se usar técnicas especiais, como a *Sifcon (SlurryInfiltrated Fiber Concrete)*, que usa de uma estratégia de colocar fibras de aço em um molde, antes de misturá-las na matriz. A tática permite que teores de 8 a 12% sejam combinados com o concreto. (GARCEZ, 2005).

4.4.4.2. Fator de forma

Caracteriza-se fator de forma a relação entre o comprimento da fibra e seu diâmetro da seção transversal como ilustra a FIG. 13.

Figura 13 – Conceituação de fator de forma da fibra.



Fonte: Nunes (2006).

Essa característica é capaz de indicar a eficiência da fibra na melhor absorção de energia do compósito. Tendo um aumento no fator de forma, representará um aumento no comprimento da fibra ou uma minimização do diâmetro da seção transversal desta, logo isso pode significar uma melhora na resistência ao arrancamento das fibras mediante um aumento do comprimento de ancoragem. (METHA; MONTEIRO, 1994, apud GARCEZ, 2005).

Segundo Nunes (1998), quando se tem um maior número de fibras, essas atuam como uma ponte de transferência de tensões em uma unidade de volume do material, melhorando o comportamento pós-fissuração deste. Ainda de acordo com o autor considerado, o aumento de fator de forma em uma fibra com comprimento fixo representa redução no diâmetro.

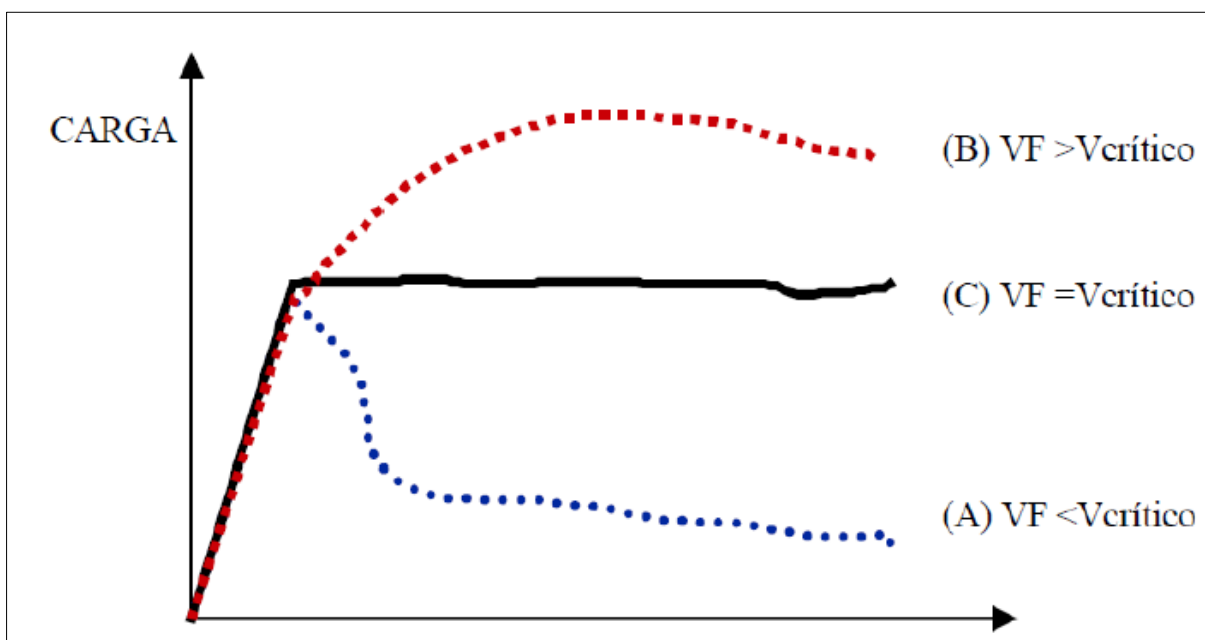
O fator de forma define a esbeltez da fibra. Esta relação define que, quanto maior for este fator, maior o número de fibras por unidade de massa.

4.4.4.3. Volume Crítico

Segundo Figueiredo (2000), o volume adequado de fibras é a concentração acima da qual se consegue manter a capacidade portante após a ruptura da matriz, ou seja, que haja uma majoração na resistência última do compósito devido ao acréscimo das fibras. O autor ilustra o conceito de volume crítico com curvas de cargas x deflexão de prismas de concretos com fibras rompidos com forças de

flexão. Inicialmente observa-se, no estado pré-fissuração, um trecho elástico linear e em outro trecho verifica-se claramente concretos reforçados com teores superiores, inferiores e iguais ao volume crítico das fibras. (GRAF. 8).

Gráfico 8 - Comportamento de compósitos reforçados em ensaios de tração na flexão com diferentes teores de fibras

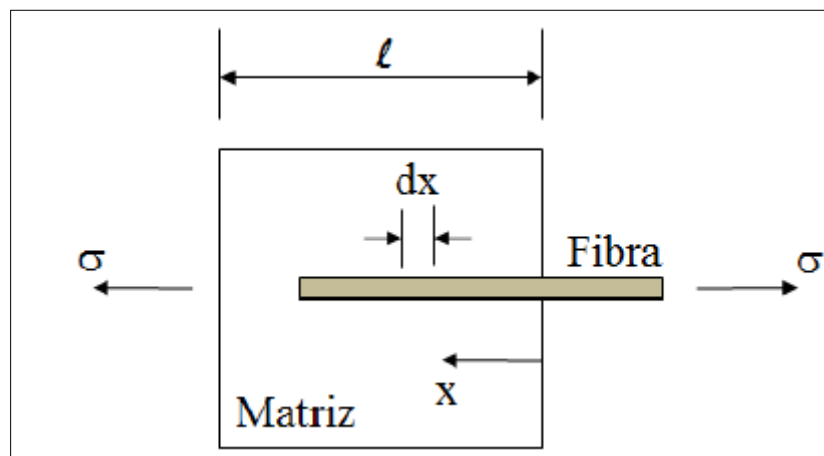


Fonte: Figueiredo (2000).

4.4.4.4. Comprimento Crítico

Conforme Vasconcelos (2012), a fibra deve ter um comprimento mínimo, para gerar tensão no meio dela, a fim de alternar a distribuição de tensões entre a matriz e as fibras esse comprimento mínimo é também chamado comprimento crítico, melhor entendido pelo modelo de BENTUR; MINDESS, 1990. (GARCEZ, 2005).(FIG. 14).

Figura 14 – Esquema de aderência da fibra na interação fibra-matriz.



Fonte: (Bentur; Mindess, 2005, apud Vasconcelos, 2012)⁶.

O esquema acima retrata a transferência de tensões (σ) entre a fibra e a matriz, sendo esse mecanismo de interação muito importante para elevar os valores de resistência e rigidez do compósito, para tanto, fibras curtas podem ser pouco eficientes nessas circunstâncias quando a carga é aplicada sobre a matriz. (VASCONCELOS, 2012).

Se a ancoragem da fibra na matriz não for suficiente ou seja, o comprimento de fibra embutido é menor que o comprimento crítico ($l < l_c$), pode gerar ruptura das fibras e tensões de escoamento, nessa ocasião, ao aumentar a abertura da fissura e a deformação do material, haverá o arrancamento mais rápido do menor comprimento da fibra embutido na matriz quando essa estiver atuando como uma transmissora de tensões, logo a atuação das fibras não será satisfatória. Quando ocorre o contrário, isto é, comprimento de fibra embutido é maior que o comprimento crítico ($l > l_c$), as fibras se travam na matriz, evitando o seu arrancamento, elevando a tensão atuante e prolongando a sua ruptura. No caso de ($l = l_c$), atinge-se a máxima tenacidade do compósito. No entanto, estas condições são bem teóricas já que não se pode prever onde ocorrerá a fissura em relação ao comprimento da fibra, já que as duas extremidades das fibras podem não estar ancoradas da mesma forma. (GARCEZ, 2012).

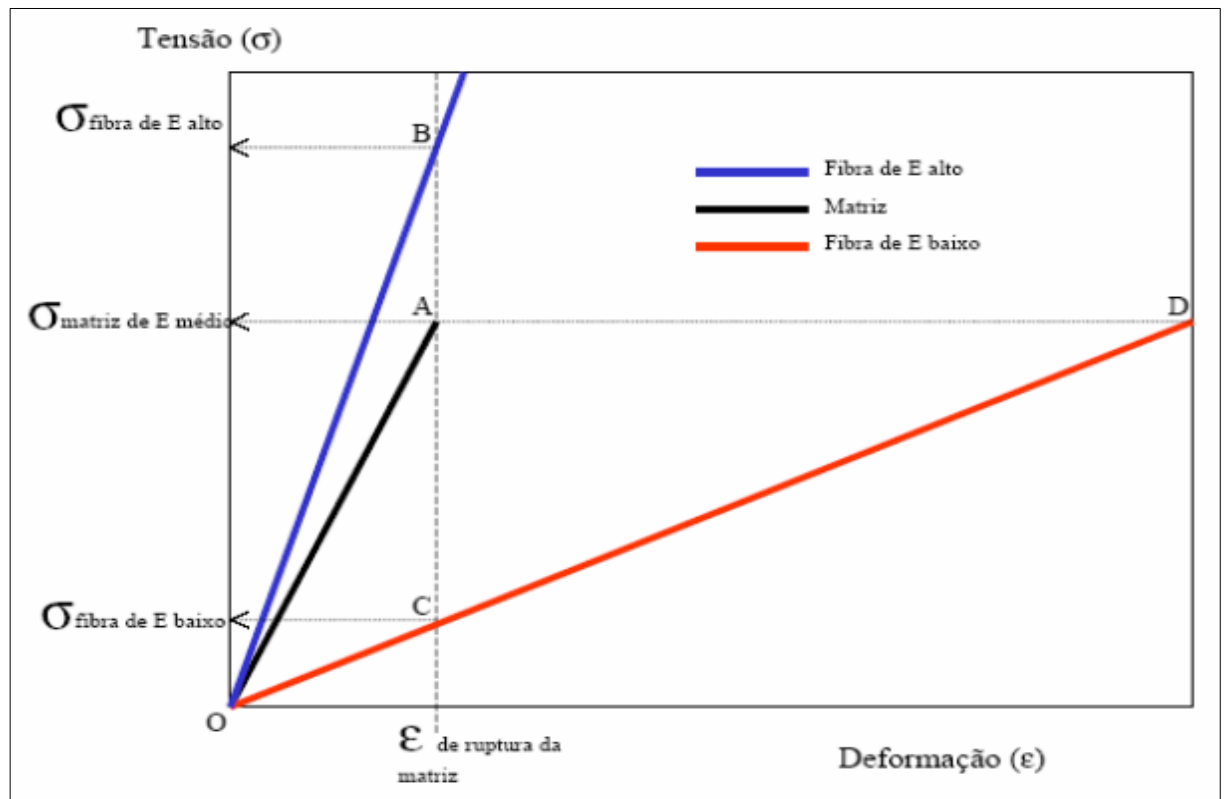
⁶BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber Reinforced cementitious composites**. New York: Elsevier Applied Science. 2005.

4.4.4.5. Módulo de Elasticidade das Fibras

Módulo de elasticidade da fibra pode ser um fator culminante no comportamento final do composto fibroso. Fibras como as de aço, vidro, carbono, por exemplo, possuem alto módulo de elasticidade já as de polipropileno e nylon são possuem tal fator relativamente baixo. (TANESI; TORNERI; VALOIS 1997).

O comportamento de duas fibras: uma com módulo de elasticidade alto e outra com módulo de elasticidade baixo, admitindo-se que apresentem atuação elástica perfeita, pode ser representado no GRAF. 9.

Gráfico 9 - Diagrama de tensão x deformação elástica



Fonte: Figueiredo (2000).

Quando ocorre a ruptura da matriz há uma transferência de tensões para a fibra de baixo módulo como esta pode suporta um nível de tensão mais elevado, prolonga-se a deformação até o ponto D. Em alguns casos, as fibras de baixo módulo podem não oferecer reforço satisfatório após a fissuração da matriz,

permitindo uma intensa deformação do composto e conseqüentemente um aumento de fissuração, caso tenha resistência e ductilidade o bastante para atingir o ponto de tensão D. Já a fibra de alto módulo já apresentará um alto nível de tensão quando ocorrer a ruptura da matriz, ocorrendo a transferência de tensões no ponto B (GARCEZ, 2012).

É importante salientar que nas primeiras idades do concreto o módulo de elasticidade da matriz cimentícia pode variar. O uso de fibras, em argamassas de revestimento, por exemplo, é uma alternativa para se elevar o módulo do compósito nas idades iniciais, para impedir que ocorra a fissuração. Existem hoje no mercado, aditivos aceleradores de pega e redutores de água que são usados em conjunto com o concreto, e podem elevar o módulo de elasticidade do compósito devido à isso as fibras de baixo módulo de elasticidade só atuam como reforço durante pouco tempo após o lançamento do concreto. (FIGUEIREDO, 2000).

4.4.4.6. Distribuição e ancoragem das fibras

A direção da propagação de uma fissura de tração é transversal à direção de tensão atuante logo, com o aumento do número de fissuras haverá uma redução da área disponível para suportar cargas atuantes. Para tal consideração, o mecanismo de ruptura por tração pode ser por fissuras já existentes ou desenvolvidas nas primeiras fases de cargas, o que não acontece nos casos de ruptura por compressão que admite numerosas fissuras. Por isso, quanto maior o número de fibras dispostas no sentido principal de tração melhor o comportamento do CRF. Para melhor acomodar as fibras nesse sentido pode-se utilizar de técnicas que favoreçam a situação. É usual, misturar as fibras no concreto de forma homogênea e aleatória, no entanto, fibras de comprimento maior podem se orientar durante a fase de lançamento. (FIGUEIREDO, 2000).

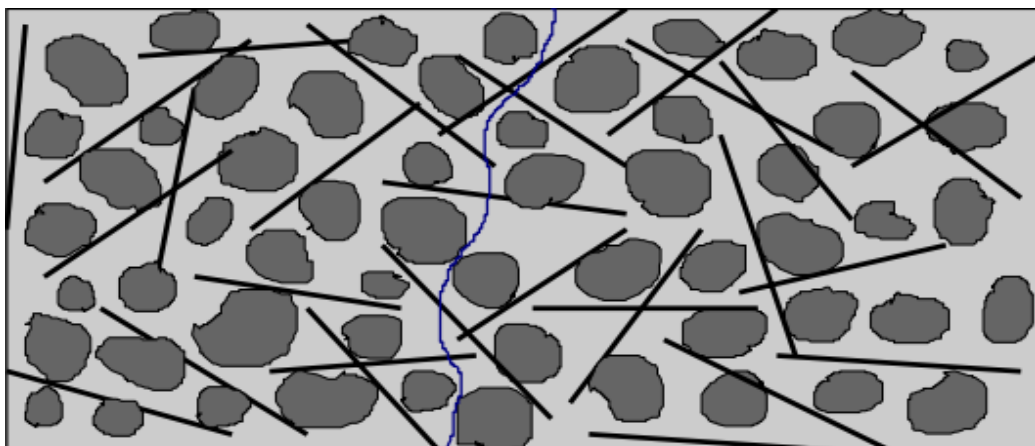
Nos casos de reforço em concretos de baixa e média resistência mecânica, as fissuras tendem a se propagar principalmente na região de interface entre os agregados graúdos e a pasta, estando a fibra atuando como uma transmissora de

tesões nas fissuras, assim, para que as fibras se posicionem corretamente recomenda-se usar nesses casos fibras de comprimentos duas vezes maiores que a dimensão máxima do agregado, dessa forma, a fibra trabalha como um reforço geral do concreto e não apenas como um reforço de argamassa. Quando a compatibilidade entre fibras e agregados graúdos não é suficiente poucas fibras atuam como pontes de transferência, afetando no desempenho geral do CRF. (GARCEZ, 2012).

4.4.4.7. Considerações práticas

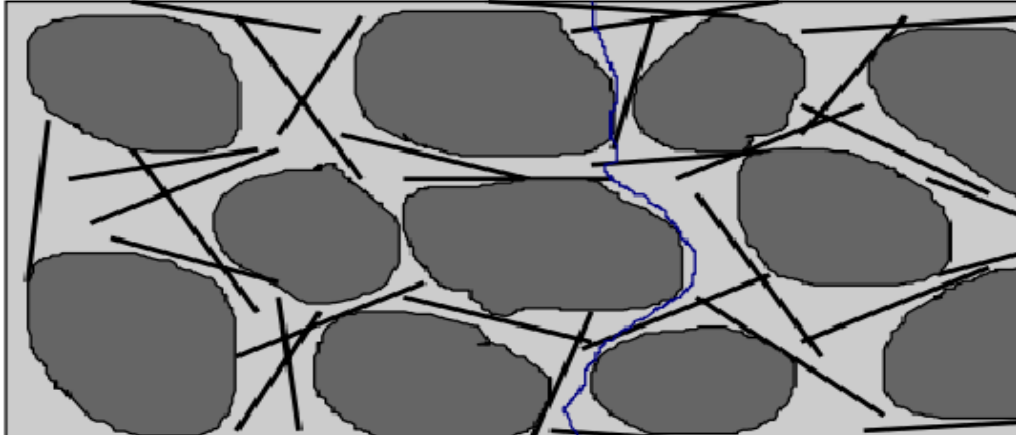
Para que se tenha uma eficiência satisfatória em compósitos fibrosos deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras. Recomenda-se utilizar fibras cujo comprimento seja maior ou igual ao dobro da dimensão do agregado graúdo usado. Esta compatibilidade deve haver de modo que as fibras interceptam com maior frequência a fissura que ocorre no compósito possibilitando que a fibra atue como reforço do concreto e não apenas como um mero reforço de argamassa. (FIG.15 e FIG.16). (FIGUEIREDO, 2010)

Figura 15 - Concreto reforçado com fibras com compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo



Fonte: Figueiredo (2010).

Figura 16 - Concreto reforçado com fibras sem compatibilidade dimensional entre estas e o agregado graúdo



Fonte: Figueiredo (2010).

A fratura nos compósitos tende a se difundir na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta para concretos de baixa e moderada resistência. Desse modo, as fibras atuam como pontes de transferência de tensões nas fissuras e deve ter comprimento necessário para favorecer o posicionamento correto em relação à fissura. Identificamos nas figuras acima, onde não há a compatibilidade dimensional que há uma quantidade pequena de fibras atuando como ponte de transferência de tensões. Dessa forma, há duas maneiras de se precaver a não compatibilidade dimensional: ou se diminui a dimensão do agregado graúdo ou aumenta-se o comprimento da fibra. (FIGUEIREDO, 2000).

4.4.5. Dosagem do CRF

Como o concreto convencional, o concreto reforçado com fibras também deve ser dosado corretamente para que o mesmo no seu estado endurecido garanta resistência e durabilidade.

4.4.5.1. Dosagem da matriz cimentícia

É preciso dosar a quantidade da argamassa adequando-a de modo a garantir coesão da matriz e bons acabamentos, para isso é fundamental utilizar o teor de fibras necessário para se atender os requisitos esperados, de modo a não interferir no teor de argamassa ideal. Feito isso, os traços podem ser desdobrado com diferentes quantidades de cimento como se faz para o concreto convencional, obtendo-se curvas de dosagem para a matriz. (FIGUEIREDO, 2011).

Figueiredo (2010), além de se preocupar com a resistência pretendida para o concreto recomenda-se averiguar também condições de aplicação, manuseio e alterações na trabalhabilidade.

Ainda de acordo com o autor citado acima, é importante considerar dois principais fatores:

- Fator água/cimento: para o CRF, essa relação deve ser menor que 0,55 se o compósito não atingir a trabalhabilidade necessária, recomenda-se o uso de aditivos super plastificantes.
- Trabalhabilidade: estima-se que o abatimento varia de 10 +/- 2cm (*slump test*), para compósitos fibrosos.

4.4.5.2. Dosagem das fibras

Primeiramente, a escolha do tipo de fibra é essencialmente importante pois se deve levar em conta a finalidade do uso do CFR.

Existem hoje dosadores especiais para esse tipo de serviço, temos hoje dosadores de médio porte e de grande porte. Dosadores de médio porte consistem em um sistema de ar pressurizado, são abastecidos com sacos ou caixas de fibras, essas que passam por um conduto da base local até o caminhão- betoneira, trabalhando em uma velocidade de adição de 40 a 80 kg/min. Os dosadores de grande porte, são equipamentos fixos e próprios para usinas de concreto, são

abastecidos com *big bags* de até 1600 kg, podem lançar as fibras em esteiras, caminhões ou misturadores automáticos. Operam em uma velocidade de 200 kg/min. (FIGUEIREDO, 2010)

A adição de fibras no concreto pode duplicar seu custo total, logo, vale ressaltar que a viabilidade econômica não está apenas no seu custo unitário e sim na economia global que o concreto reforçado com fibras pode propiciar. Muitas vezes, principalmente na prática internacional, usa-se fixar traços independentemente das características da matriz de concreto e das fibras. Porém, para otimizar o uso do CRF recomenda-se definir a dosagem mínima de fibras necessárias para garantir as exigências de desempenho do compósito. (MEHTA; MONTEIRO⁷, 1994, apud WATANABE, 2008).

4.4.6. Aplicações do CRF

O CRF pode ser utilizado em muitas ocasiões sendo geralmente esse material é mais usado em reforços de fundações superficiais como radiers, reforço de pavimentos industriais e revestimento de túneis e taludes.

A adição de fibras para reforço de fundações superficiais foi estudada por CASAGRANDE (2001), onde foi analisado a influência da adição de fibras em uma camada superficial de solo compactada e teve como desfecho do estudo que a camada reforçada com fibras se apresentou mais rígida e resistente quando comparada com a camada não reforçada. De acordo com tal experimento o emprego de fibras para essa finalidade vem crescendo. (WATANABE, 2008).

Outra aplicação do CRF é a execução de pavimentos, essa que no Brasil, de acordo com os fabricantes de fibras, já ultrapassou mais de dois milhões de metros quadrados. Essa marca se deve pelo fato do uso de fibras ser um processo mais simplificado, não utilizando telas de aços soldadas, o que economiza tempo de

⁷ MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

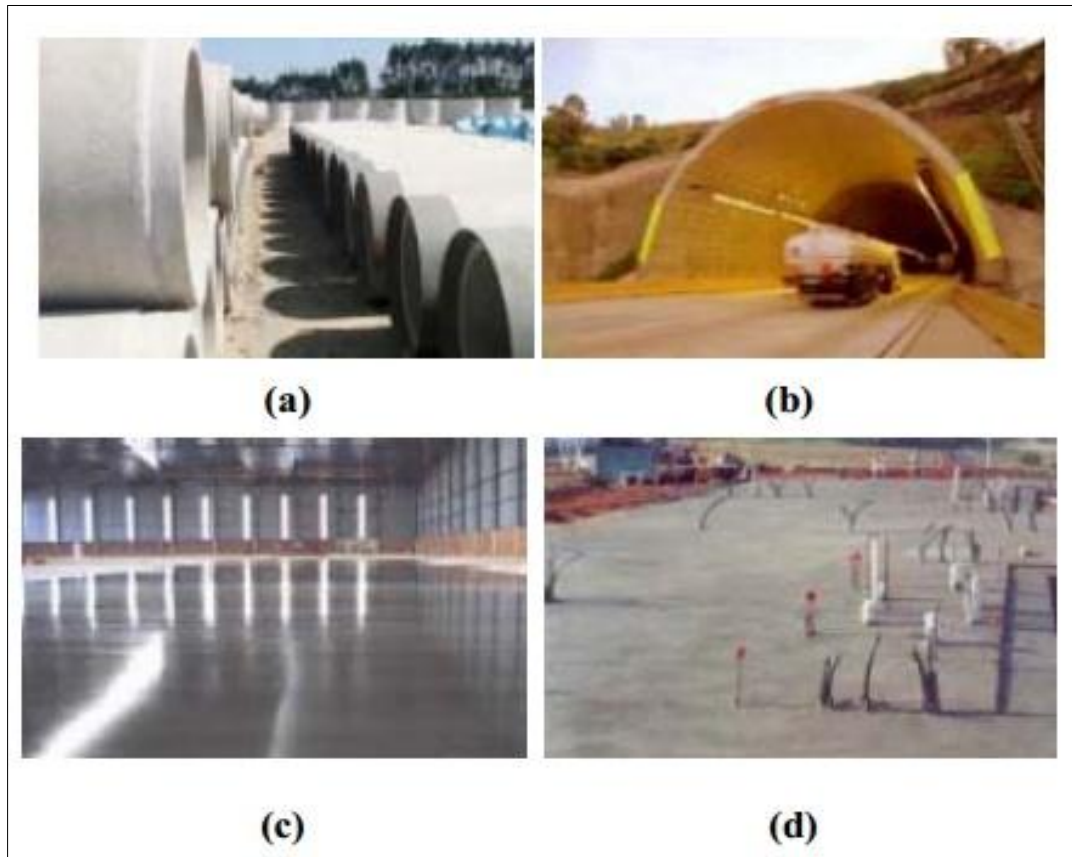
aplicação das telas e número de operários, não é preciso utilizar espaçadores metálicos, garante reforço por igual em toda espessura do pavimento, permite o corte das juntas de dilatação sem a necessidade de barras de transferência pré-instaladas e ainda oferece maior facilidade de acesso ao local da concretagem. (WATANABE, 2008).

Ainda assim, alguns cuidados relativos à cura dos pavimentos devem ser observados, pois mesmo diante da minimização de fissuração do pavimento pode ocorrer o empenamento do pavimento por retração diferencial que ocorre quando a parte externa do composto seca antes da parte interna. E além dessa desvantagem, algumas fibras podem ficar na superfície do concreto mesmo quando o acabamento superficial do acabamento já foi finalizado, estas ficaram expostas ao ambiente e conseqüentemente à corrosão gerando pontos de ferrugem sobre o pavimento. (MOSCATELLI, 2011).

O revestimento de túneis pode ser executado também com concreto projetado reforçado com fibras o que dispensa o uso de tela metálica e pode ser revestido logo após a escavação diminuindo o risco de acidentes por desprendimentos do solo e viabilizando tempo e segurança da obra. (SALVADOR, 2013).

Revestir túneis a partir do compósito além da vantagem citada acima tem como vantagem também uma melhor acomodação do maciço recém escavado com o concreto reforçado com fibras do que com o concreto convencional, a durabilidade do revestimento também pode aumentar devido a minimização da fissuração que geralmente é a entrada de agentes agressivos para o interior do revestimento. (WATANABE, 2011). Alguns exemplos de aplicações podem ser vistos na FIG. 16.

Figura 17 - Aplicações de concreto reforçados com fibras em (a) tubos de concreto, (b) concreto projetado, (c) pisos industriais e (d) radiers.



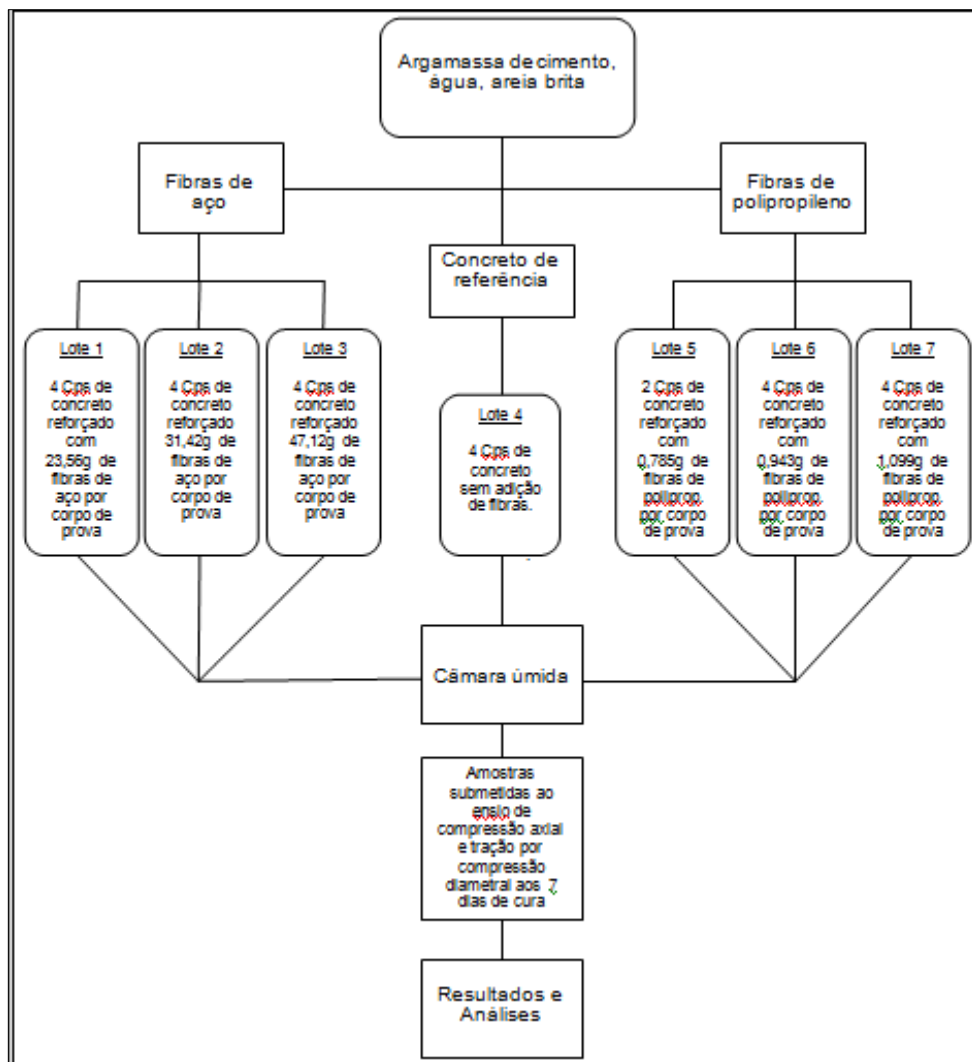
Fonte: Garcez (2005).

5.0. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho se iniciou com uma revisão bibliográfica, sobre os principais tipos de fibras e suas propriedades. Em seguida foram mencionados os efeitos das fibras quando incorporadas ao concreto. Enfim, foram realizados ensaios de laboratório com 22 corpos de prova a fim de testar as propriedades das fibras no concreto.

Para uma melhor clareza e entendimento dos procedimentos utilizados no estudo, foi desenvolvido um fluxograma que pode ser visto na FIG. 18.

Figura 18 - Fluxograma simplificado do estudo



Fonte: O autor (2014).

A revisão bibliográfica conduziu estratégias que permitiram a variação de diferentes dosagens de fibras de aço e de polipropileno para o feitiço dos compósitos. Os ensaios realizados foram compressão axial e tração por compressão diametral, a partir de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 10x20cm, e para efeito de comparação, foram moldados corpos de prova sem adição de fibras. Os corpos de prova foram rompidos aos 7 dias de cura.

Todos os procedimentos relacionados aos ensaios foram realizados no laboratório de concreto, da empresa Pavidez, localizada na cidade de Arcos/MG.

5.1. Materiais

Os materiais utilizados no estudo foram:

- Cimento Nacional CP V ARI MAX;
- Areia grossa;
- Brita 0,
- Água para amassamento;
- Fibras de aço Maccaferri Wirand ancoradas nas extremidades;
- Fibras de polipropileno Maccaferri Fibromac 6;
- Moldes para corpos de prova com dimensões 10x20cm;
- Balança de precisão em quilos da marca Urano – US 15/5;
- Balança de precisão em gramas da marca Marte – AD 3300
- Material para *Slump test*;
- Trena de três metros;
- Prensa manual hidráulica da marca Contenco.

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (ARI), tipo CP V. Esse cimento gera alta resistência nas primeiras idades do concreto, devido à moagem mais fina do cimento, conseguindo reagir com água e adquirir alta resistência em maior velocidade. Fez-se necessário o uso desse cimento em virtude do curto período de tempo em que a parte experimental desse trabalho foi executada. (FIG. 19).

Figura 19 - Cimento Nacional CPV ARI MAX



Fonte: O autor (2014).

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa de rio, oriunda do Rio Santana, localizado no município de Japaraíba / MG. A FIG. 20 ilustra a areia utilizada no estudo.

Figura 20 - Areia utilizada no estudo



Fonte: O autor (2014).

O agregado graúdo utilizado foi brita calcária. O agregado foi retirado no estoque da Empresa Britamil, lavado e seco ao ar antes da utilização. A FIG.21 ilustra a brita utilizada no estudo.

Figura 21 - Pedra britada utilizada no estudo



Fonte: O autor (2014).

A água utilizada na mistura do concreto foi água potável disponível na rede local de abastecimento da cidade de Arcos / MG.

As fibras de aço utilizadas são produzidas com baixo teor de carbono, trefilado a frio, fabricadas e fornecidas pela indústria Maccaferri, associadas ao concreto atuam como uma armadura tridimensional, possuem algumas especificações técnicas como mostra a TAB. 1. A FIG. 22 mostra as fibras de aço utilizadas no estudo.

Tabela 1 - Especificações técnicas da fibra de aço utilizadas no trabalho segundo o fabricante

Propriedades Físicas		FF1
Relação L/d (comprimento / diâmetro)		50
Diâmetro	mm	1.00
Comprimento	mm	50
Propriedades Mecânicas		FF1
Resistência à tração do aço	MPa	>1100
Deformação na ruptura	%	<4
Módulo Elástico	MPa	210000

Fonte: Maccaferri

Figura 22 - Fibras de aço utilizadas no trabalho



Fonte: O autor (2014).

As fibras de polipropileno utilizadas são compostas por multifilamentos, produzidos através do processo de extrusão, fabricadas e fornecidas pela indústria Maccaferri, possuem algumas especificações técnicas como mostra a TAB. 2. A FIG. 23 mostra as fibras de polipropileno utilizadas no estudo.

Tabela 2 - Especificações técnicas da fibra de polipropileno utilizadas do trabalho segundo o fabricante

Propriedades Físicas		FF1
Diâmetro	µm	18
Seção		Circular
Comprimento	mm	6
Alongamento	%	80
Peso Específico	g/cm ³	0.91
Propriedades Mecânicas		FF1
Resistência à tração (N/mm ²)	MPa	300
Temperatura de Fusão	°C	160
Temperatura de Ignição	°C	365

Fonte: Maccaferri

Figura 23 - Fibras de polipropileno utilizadas no estudo



Fonte: O autor (2014).

Foram utilizados 22 moldes metálicos para corpos de prova cilíndricos de dimensões 10x20cm. (FIG. 24).

Figura 24 - Moldes para corpos de prova



Fonte: O autor (2014).

Para a homogeneização dos materiais, foi utilizada uma betoneira com capacidade de mistura de 220 litros.

Para a pesagem dos materiais componentes do concreto utilizou-se uma balança de precisão em quilos e para a pesagem das fibras uma balança de precisão em gramas.

Ainda foram utilizados um conjunto para *Slump test* da marca Contenco, e uma trena de três metros da marca Stanley.

Utilizou-se uma prensa manual hidráulica da marca Contenco, para o rompimento dos corpos de prova, com capacidade de 100 toneladas, com manômetro de Ø 10", escala de 0-120.000 Kgf. (FIG. 25).

Figura 25 - Prensa utilizada para o rompimento dos corpos de prova



Fonte: O autor (2014).

5.2. Métodos

Inicialmente foi calculado um traço padrão para o feitiço dos corpos de prova, utilizando-se o método ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), fixando-se a resistência característica do concreto em 35MPa, o traço obtido foi 1:1,82:1,48, sendo cimento, areia e brita respectivamente.

Posteriormente foram definidas as dosagens das fibras com base na recomendação mínima do fabricante. A indústria Maccaferri recomenda uma

dosagem mínima de fibras de aço de 20kg/m³ de concreto, e para as fibras de polipropileno uma dosagem mínima de 600kg/m³ de concreto. Levando isso em consideração, optou-se por trabalhar com uma dosagem abaixo da recomendada, a dosagem recomendada e uma acima da recomendada tanto para as fibras de aço quanto para as de polipropileno. Feito isso, foi estabelecido a dosagem por corpo de prova. A TAB. 3 ilustra melhor tais definições.

Tabela 3 - Dosagem das fibras

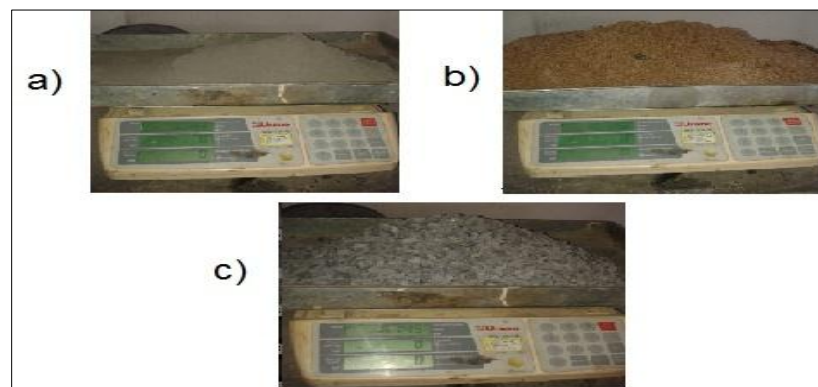
Compósito	Dosagem de fibras (kg/m ³)		
	CRFA	15	20
CRFP	500	600	700
Compósito	Dosagem de fibras (g/molde)		
	CRFA	23,56	31,42
CRFP	0,785	0,943	1,099

Fonte: O autor (2014).

A tabela acima foi construída com base no volume do molde cilíndrico utilizado que é de $1,57 \times 10^{-3}$. Pré-estabelecidos os valores por metro cúbico de concreto, utilizou-se a regra de três para se obter os valores de dosagens por molde.

A confecção dos corpos de prova foi dividida em lotes como mostrou a FIG. 18. Antes do preparo de cada lote todos os materiais componentes foram devidamente pesados em uma balança de precisão em quilos, e a água medida em litros. (FIG. 26).

Figura 26 - Pesagem dos materiais componentes do concreto (a) pesagem do cimento, (b) pesagem da areia, (c) pesagem da brita.



Fonte: O autor (2014).

Após a pesagem da matéria prima os materiais foram adicionados à betoneira cuidadosamente, e a mistura se deu num intervalo médio de dois minutos. Posteriormente, prosseguiu-se com a adição das fibras gradativamente para evitar a formação de ouriços e agitou-se a mistura por mais cinco minutos como prevê a fabricante das fibras.

Com o concreto já preparado foi realizado o *Slump Test* e medido o valor do abatimento do tronco do cone. O ensaio se fez preciso para testar a consistência do concreto. Segundo literatura especializada, os valores de abatimento para o CRF, variam de 100+/- 20mm. Fixou-se o valor de abatimento descrito por literatura, tanto para o concreto de referência quanto para o CRF. O valor de abatimento encontrado na amostra de concreto foi de 80mm. (FIG. 27).

Figura 27 - Slump Test realizado no experimento



Fonte: O autor (2014).

A etapa que antecede a moldagem dos corpos de prova foi a limpeza dos moldes. Foi passado nos moldes óleo mineral que é um procedimento que se faz necessário para não ocorrer a fragmentação do corpo de prova na hora da desforma.

O concreto foi colocado nas fôrmas em duas camadas. O adensamento foi manual, se deu de maneira uniforme e cada camada foi golpeada com 13 golpes. (FIG. 28).

Figura 28 - Adensamento do concreto



Fonte: O autor (2014).

Os processos descritos acima foram feitos com todos os lotes.

Após a moldagem, os moldes foram etiquetados para identificá-los, e cobertos com um papelão para evitar a perda de água e protegê-los contra intempéries. (FIG. 29).

Figura 29 - Corpos de prova etiquetados

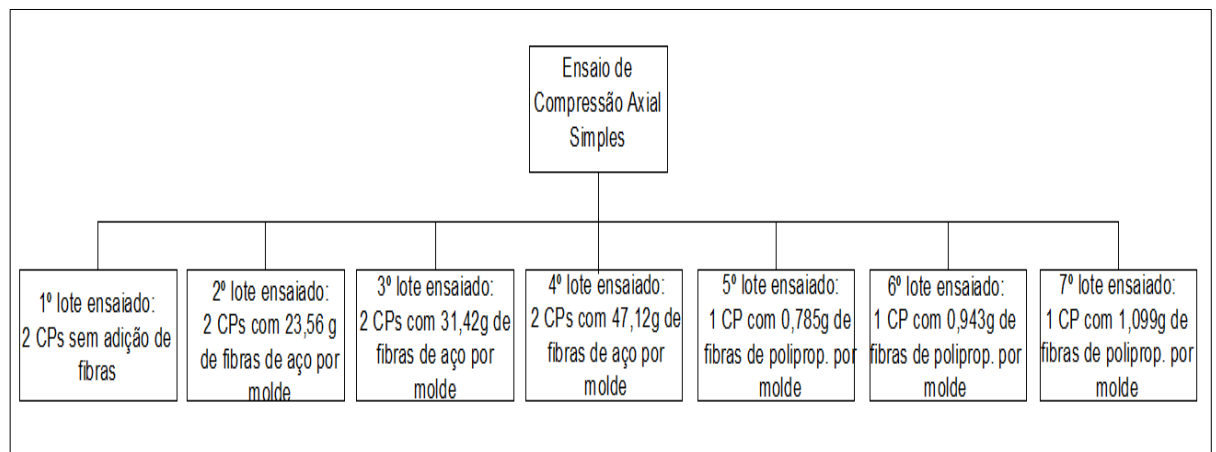


Fonte: O autor (2014).

Após 24 horas do início da moldagem, os corpos de prova foram desformados e confinados em uma câmara úmida onde permaneceram por 7 dias.

Os ensaios realizados foram compressão axial simples e tração por compressão diametral. O primeiro ensaio realizado foi o de compressão axial e seguiu uma sequência como pode ser vista na FIG. 30.

Figura 30 - Sequência do ensaio de compressão axial simples



Fonte: O autor (2014).

A FIG. 31 mostra o detalhe da compressão axial na prensa hidráulica. Para encontrar a resistência à compressão obtida, segundo a norma NBR 5739/94, divide-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo de prova, obtendo-se o resultado em MPa.

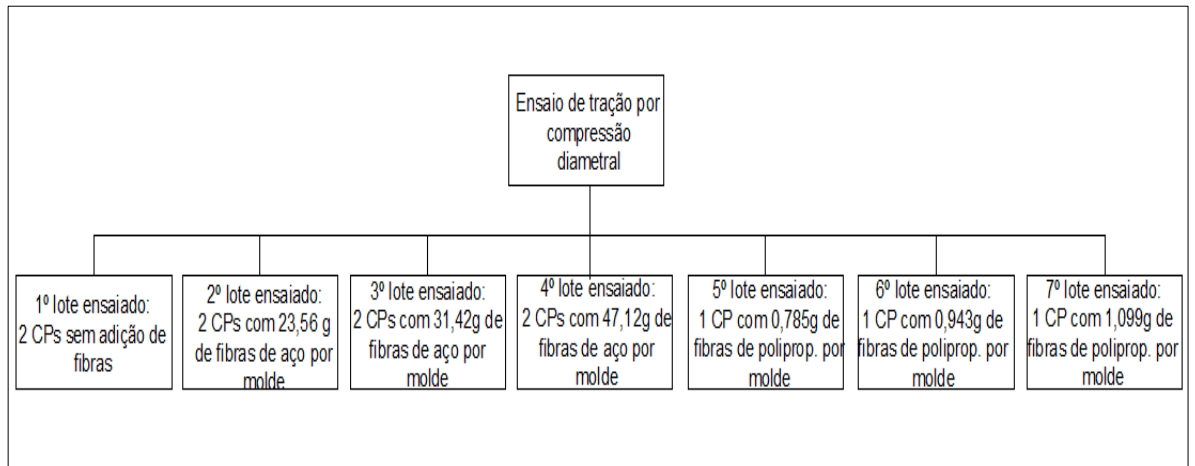
Figura 31 - Detalhe do rompimento do corpo de prova por compressão axial



Fonte: O autor (2014).

Para o ensaio de tração por compressão diametral deve-se colocar o corpo de prova em repouso no centro dos pratos metálicos da prensa. Esse ensaio seguiu uma sequência que pode ser vista conforme FIG. 32.

Figura 32 - Sequência do ensaio de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2014).

A FIG. 33 ilustra o detalhe da tração por compressão diametral na presa hidráulica.

Figura 33 - Detalhe do rompimento de tração por compressão diametral



Fonte: O autor (2014).

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela Equação 1.

$$F_{t,D} = \frac{2F}{\pi dL} \quad (1)$$

Onde:

$F_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05 MPa;

F = carga máxima obtida no ensaio, em Kn;

d = diâmetro do corpo de prova, em mm;

L = altura do corpo de prova, em mm.

Após todo este processo, todos os dados foram recolhidos e analisados para se chegar aos resultados finais.

6.0. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados com os agregados, os resultados dos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral.

Os gráficos que serão apresentados no decorrer dos resultados foram gerados a partir de tabelas que se encontram localizadas no apêndice C do presente trabalho.

6.1. Resultados dos ensaios dos agregados

A areia utilizada na parte experimental foi classificada como areia grossa, e de acordo com a NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, conforme o ensaio de granulometria realizado possui características que podem ser vistas TAB. 4.

Tabela 4 - Caracterização granulométrica do agregado miúdo

Abertura da peneira (mm)	12,7	9,52	4,76	2	0,42	0,18	0,07
% retida	1,05	2,63	4,36	8,75	65,37	95,17	98
% passada	98,95	97,37	95,64	91,25	34,63	4,83	2
Módulo de Finura	3,4						
Massa Específica (g/cm ³)	2,6						

Fonte: Laboratório de concreto Pavidez Engenharia LTDA

Nota: Dados extraídos no ensaio de granulometria de agregados.

A brita utilizada no estudo foi classificada como brita 0, e de acordo com a NBR 7217 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, conforme o ensaio de granulometria realizado possui características que podem ser vistas TAB. 5.

Tabela 5 - Classificação granulométrica do agregado graúdo

Abertura da peneira (mm)	12,7	9,52	4,76	2	0,42	0,18	0,07
% retida	0,63	5,6	68,3	84,46	91,34	92,53	93,37
% passada	99,37	94,4	31,7	15,54	8,66	7,47	6,63
Dimensão máxima característica (mm)	9,5						
Massa Específica (g/cm ³)	2,7						

Fonte: Laboratório de concreto Pavidez Engenharia LTDA

Nota: Dados extraídos no ensaio de granulometria de agregados.

6.2. Ensaio mecânicos do concreto

A fase experimental deste trabalho objetivou ensaiar corpos de prova, e apresentar a comparação entre o concreto sem adição de fibras, concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno, analisando os resultados obtidos nos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral.

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios experimentais sobre o comportamento mecânico do concreto de referência (CR), do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) e do concreto reforçado com fibras de polipropileno (CRFP).

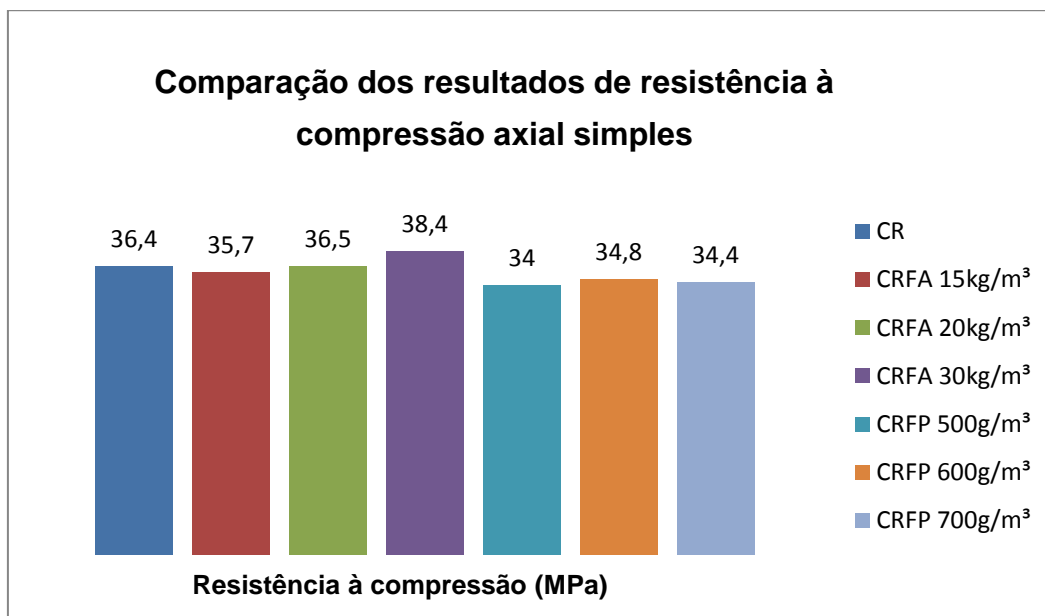
6.2.1. Resistência à compressão axial simples

O ensaio de compressão axial objetiva determinar a carga máxima de ruptura suportada pela amostra de concreto. Os dados a seguir competem aos resultados desse tipo de ensaio de onze corpos de prova, retirados das concretagens para moldagem do concreto de referência (CR), concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) e concreto reforçado com fibras de polipropileno (CRFP).

Para avaliar a resistência à compressão axial foram ensaiados onze corpos de prova confinados sete dias em câmara úmida. Foram ensaiados dois CPs sem adição de fibras, dois CPs de cada dosagem de fibra de aço e um CP de cada

dosagem de fibras de polipropileno. O GRAF. 10 retrata melhor os resultados desses ensaios.

Gráfico 10 - Resultados dos ensaios de compressão axial



Fonte: O autor (2014).

Analisando o gráfico acima, percebemos que os valores de resistência à compressão não se alteraram tanto. A incorporação de fibras não agregou muito nos resultados dos compósitos.

Observamos que nos compósitos reforçados com fibras de aço obtivemos um pequeno aumento de resistência quando aumentamos os teores de fibras, mas esse aumento não chega a ser tão expressivo. Já para os compósitos reforçados com fibras de polipropileno, os resultados sofreram poucas variações, se mantiveram praticamente constantes.

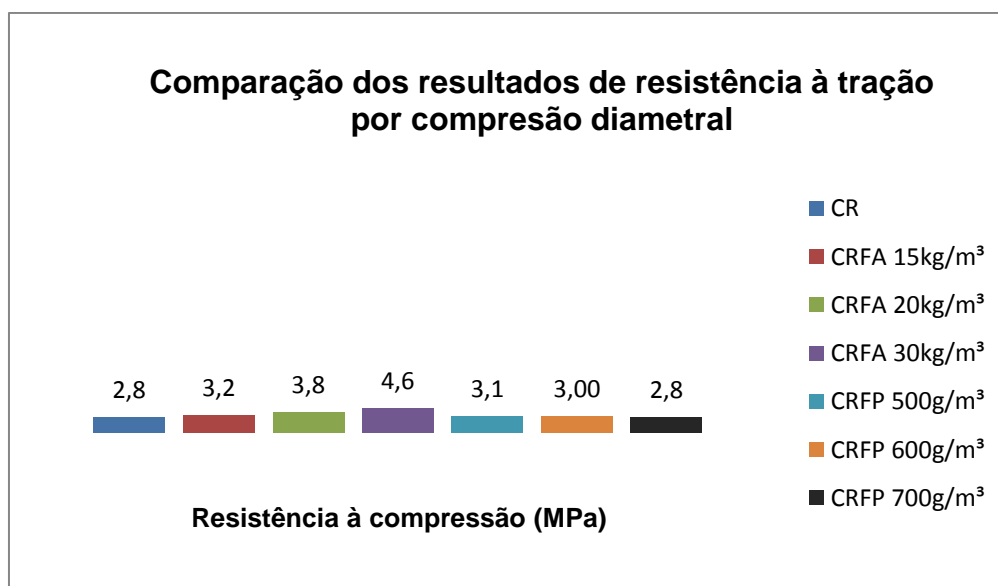
6.2.2. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral consiste em gerar tensões de tração uniformes perpendiculares ao diâmetro do corpo de prova, aplicando uma

força linearmente distribuída e diametralmente oposta. Dessa forma, a força é concentrada sobre o corpo de prova até que se ocorra a sua ruptura. Esse ensaio determina um importante parâmetro na caracterização dos concretos, em especial do concreto reforçado com fibras, acreditando-se que as fibras podem agregar nos valores de resistência à tração.

Para avaliar a resistência à tração por compressão diametral foram ensaiados onze corpos de prova confinados sete dias em câmara úmida. Foram ensaiados dois CPs sem adição de fibras, dois CPs de cada dosagem de fibra de aço e um CP de cada dosagem de fibras de polipropileno. O GRAF. 11 retrata melhor os resultados desses ensaios.

Gráfico 11 - Resultados dos ensaios de tração por compressão diametral



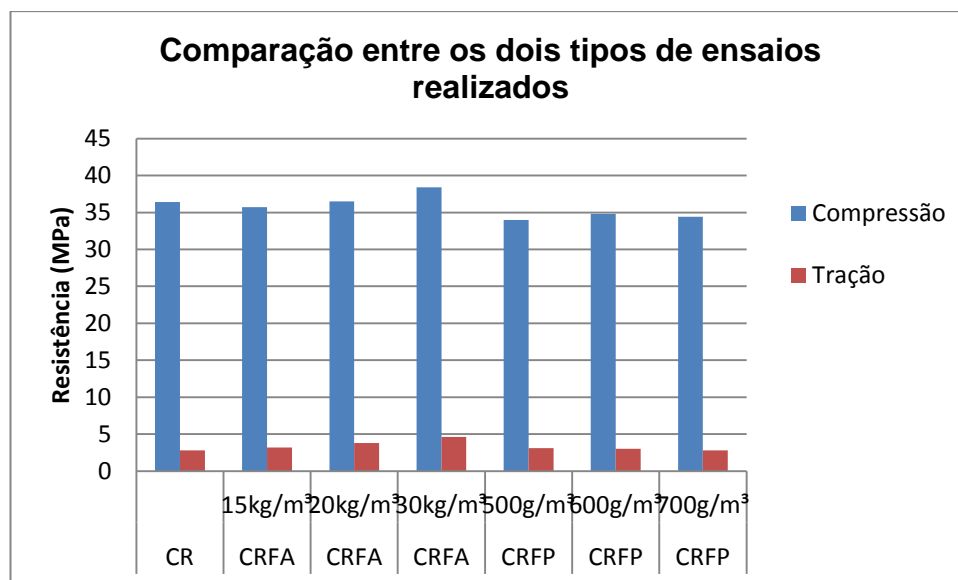
Fonte: O autor (2014).

Comparando os resultados obtidos, verificamos que a incorporação de fibras no concreto tem melhoras de resistência à tração mais significativa para o concreto reforçado com fibras de aço. Já para o concreto reforçado com fibras de polipropileno o aditivo não surtiu muito efeito, obtendo-se variações irrelevantes nesse aspecto.

6.2.3. Comparação entre os resultados dos ensaios realizados

Através dos resultados obtidos gerou-se um gráfico comparativo onde se observou o comportamento dos compósitos ensaiados por compressão e tração. (GRAF. 12).

Gráfico 12 - Comparação dos resultados dos ensaios realizados



Fonte: O autor (2014).

Observando o gráfico acima analisa-se que os resultados de resistência à compressão sofreram mais oscilações porém, os resultados de resistência à tração mostram um aumento mais acentuado para o concreto reforçado com fibras de aço. Para o concreto reforçado com fibras de polipropileno, observa-se que nos resultados dos dois ensaios o comportamento do material sofreu algumas variações, tanto de acréscimo quanto de decréscimo.

É importante salientar que alguns eventuais fatores devem ser levados em consideração na moldagem dos corpos de prova como falha no adensamento, que provoca vazios e pode impactar nos resultados dos ensaios.

7.0. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos resultados obtidos verifica-se que as fibras de aço têm boa funcionalidade quando se deseja aumentar a resistência á compressão e à tração.

Verificamos que os resultados de resistência à compressão aumentam gradativamente a medida que se aumenta o teor de fibras. Nota-se que o CRFA de dosagem 30kg/m^3 apresentou um aumento da ordem de 5,5 % em relação ao concreto sem adição de fibras, aos sete dias de cura.

Para os resultados de tração do concreto reforçados com fibras de aço, constata-se que o ganho de resistência a esse tipo de solicitante é bem expressivo. Como acontece também nos resultados de compressão, a medida que aumenta-se o teor de fibras de aço a resistência a tração se eleva cada vez mais. A dosagem de 30kg/m^3 de fibras de aço apresentou um aumento de 53,57% em relação ao concreto de referência.

Para os resultados dos ensaios realizados com o concreto reforçado com fibras de polipropileno nota-se que os gráficos apresentaram variações de acréscimo e decréscimo de resistências logo, comprova-se que o uso de fibras de polipropileno como reforço estrutural não é tão eficaz que são apenas para minimizar as fissuras por retração plástica do concreto como mencionado na fundamentação teórica desse estudo.

Os objetivos desse estudo foram atingidos ao avaliar e analisar os resultados dos ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral. Sintetizando as informações citadas acima pode-se delinear as seguintes conclusões:

- Para os compósitos reforçados com fibras de aço, quanto maior os teores de fibras maiores as resistências tanto de compressão quanto de tração;
- Os benefícios foram superiores para o CRFA quando analisadas as propriedades de tração em comparação com o concreto de referência. As fibras de aço prolongam a deformação do material ;

- A incorporação de fibras de polipropileno no concreto não apresenta ganhos de resistência que justifiquem sua utilização;
- É importante avaliar a resistência do concreto pretendida para se adequar as dosagens de fibras para que o custo unitário do concreto não se eleve a valores exorbitantes.

Como as fibras de aço foi o material que se sobressaiu nos ensaios realizados afirma-se que este apresenta melhorias satisfatórias no reforço estrutural do concreto.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações. Rio de Janeiro. 2009.

_____. **NBR 5739.** Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro. 1994.

_____. **NBR 15530:** Fibras de aço para concreto-Especificações. Rio de Janeiro. 2007.

_____. **NBR 9935:** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro. 2011.

ADÃO, F. X.; HEMERLY, A. C. **Concreto armado:** novo milênio: cálculo prático e econômico. 2. ed.. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 224 p.

ANDOLFATO, R. P. **Desenvolvimento das técnicas de produção de blocos de concreto para alvenaria estrutural na escala (1:4).** 2002. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2002.

BRANCO, C. P.; PIERETTI, R. A. **Avaliação da resistência do concreto curado entre -5° e 0°C.** 2012. 40p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnólogo de Concreto)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

CASTRO, N. S. **Influência de agregado graúdo na trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço.** 2010. 74 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2010.

CORÓ, A. G. **Investigação das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras pet.** 2002. 64 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2002.

DONATO, M. **Medidas diretas em solo reforçado com fibras de polipropileno.** 2007. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FANELLA, D. A; NAAMAN, A. E. **Stress-Strain properties of fiber reinforced mortar in compression:** ACI Journaul. 1985. p 475-483.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço:** Boletim Técnico. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. USP. 70p, 2000.

FIGUEIREDO, A. D.; TANESI, J.; NINCE, A. A., São Paulo, ed. 66, set. 2002. **Concreto com fibras de polipropileno.** Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/66/artigo287241-1.aspx>>. Acesso em: 12 de Abr. 2014.

FIGUEIREDO, São Paulo, ed. 163, out. 2010. **Piso industrial de concreto reforçado com fibras de aço.** Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/163/como-construir-piso-industrial-de-concreto-reforcado-com-fibras-285827-1.aspx>>. Acesso em: 01 de Out. 2014

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto reforçado com fibras.** 2011. 247 p. Texto (Título de Livre Docência)-Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2011.

GARCEZ, E. O. **Análise teórico-experimental do comportamento de concretos reforçados com fibras de aço submetidos a cargas de impacto.** 2005. 22 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

GUIMARÃES, D. **Pisos industriais em concreto: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos.** 2010. 88 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HELENE, P. R. L. **Manual par reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto:** PINI, São Paulo, 2010. 215 p.

JUNIOR, E. S. D.; ROCHA, L. F. S. **Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle da fissuração.** 2011. 110 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto.** 2005. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

MOSCATELLI, I. **Fibras de aço em concreto de cimento Portland aplicados a pavimento.** 2011. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 2011.

NAAMAN, A. E. **Fiber reinforcements for concrete: looking back, looking ahead.** In: RILEM Proceedings, PRO 15. Rilem Publications Sarl, p 65-86, 2000.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2010.

NUNES, N. L. **Contribuição para a aplicação do concreto reforçado com fibras de aço em elementos de superfície restringidos.** 2006. 253 p. Tese (Doutorado

em Engenharia de Construção Civil e Urbana)-Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2006

PETRUCCI, E. G. **Concreto de cimento Portland**. 2 ed. São Paulo: Globo, 1998.

PIMENTA, D. S. **Produção de concreto convencional com a utilização de pó de brita**. 2012. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

RESENDE, F. M. **Influência das fibras de aço, polipropileno e sisal no amortecimento de concreto de resistência normal de auto desempenho**. 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

ROMANO, C. A. **Apostila de tecnologia do concreto**. 2004. 102 p. Extrato do manual de tecnologia do concreto (Curso de Engenharia de Produção Civil)-Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. 2013. 178 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo-USP, São Paulo, 2013.

SANT'ANA, M. V. P. **Modelo Numérico para concreto reforçado com fibras**. 2005. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2005.

SARZALEJO, A. G. **Fibras como elemento estrutural para reforço de concreto**: manual técnico. Jundiaí: Maccaferri, 2009.

TANESI, J.; TORNERI, P.; VALOIS, A.D; **A influência das fibras de polipropileno na fissuração por retração**: 4^o congresso Ibero-americano de Patologia das Construções. 1997, p. 273 – 280.

VASCOMCELOS, R. E. **Fatura do concreto reforçado com fibras de aço e de polipropileno em meios normal e agressivo**. 2012. 158 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas, 2012.

WATANABE, P. S. **Concretos especiais – propriedades, materiais e aplicações**. 2008. 192 p. Relatório Final de Pesquisa (Bolsa de Iniciação Científica FAPESP)-Universidade Estadual Paulista-UNESP, Bauru, 2008.

APÊNDICE A – MEMÓRIA DE CÁLCULOS DO TRAÇO PARA CONFEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Dados:

- Cimento CPV ARI
- $\gamma_c = 3,1\text{kg/cm}^3$
- Fck do concreto = 35MPa
- Abatimento = 100+/- 20mm
- Desvio padrão (sd) = 7MPa – Cimento medido em massa, agregados e água em volume, umidade dos agregados estimada.
- Brita 0
- $D_{\text{máx}} = 9,5\text{mm}$
- $\gamma_b = 2700\text{kg/cm}^3$
- $\mu = 1500\text{kg/m}^3$
- Areia grossa
- MF = 3,4
- $\gamma_m = 2600\text{kg/m}^3$
- $\gamma_a = 1000\text{kg/m}^3$

Para se calcular o fck desejado aos 28 dias de cura utiliza-se a Equação 2.

$$F_{C_{28}} = f_{ck} + 1,65 \times sd \quad (2)$$

Onde:

F_{ck} = resistência desejada ;

Sd = desvio padrão

$$F_{C_{28}} = 35 + 1,65 \times 7$$

$$F_{C_{28}} = 46,55\text{Mpa}$$

Para a relação de água/cimento utilizou-se a curva de Abrams.

Curva de Abrams $F_{a/c} = 0,47$

O consumo de água é em relação ao valor de abatimento desejado. Para o consumo de cimento usa-se a Equação 3.

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \quad (3)$$

Sendo:

C_a = consumo de água;

a/c = relação de água / cimento.

$$C_c = \frac{230}{0,47}$$

$$C_c = 490\text{kg/m}^3$$

Para o cálculo do consumo de agregado graúdo utiliza-se a Equação 4.

$$C_b = V_b \times U_m \quad (4)$$

Onde:

V_b = volume do agregado graúdo seco por m^3 de concreto em relação o módulo de finura da areia;

U_m = massa unitária compactada do agregado graúdo.

$$V_b = 0,485$$

$$C_b = 0,485 \times 1500 = 727,50\text{kg/m}^3$$

Para o cálculo do consumo de agregado miúdo usa-se a Equação 5.

$$V_m = 1 - \left(\frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} \right) \quad (5)$$

Sendo:

V_m = volume de areia;

C_c = consumo de cimento;

C_b = consumo de brita;

C_a = consumo de água;

γ_c = massa específica do cimento;

γ_b = massa específica da brita;

γ_a = massa específica da água.

$$V_m = \left(\frac{490}{3100} + \frac{727,50}{2700} + \frac{230}{1000} \right)$$

$$V_m = 1 - 0,657$$

$$V_m = 0,343$$

Para o cálculo do consumo de areia em kg usa-se a Equação 6.

$$C_m = \gamma_m \times V_m \quad (6)$$

Onde:

γ_m = massa específica da areia;

V_m = volume de areia.

$$C_m = 0,343 \times 2600$$

$$C_m = 891,8 \text{ kg/m}^3$$

A apresentação do traço é feita pela Equação 7.

$$\frac{Cc}{Cc} : \frac{Cm}{Cc} : \frac{Cb}{Cc} : \frac{Ca}{Cc} \quad (7)$$

Sendo:

Cc = consumo de cimento;

Cb = consumo de brita;

Ca = consumo de água;

Cm = consumo de areia.

$$\frac{490}{490} : \frac{891,8}{490} : \frac{727,5}{490} : \frac{230}{490}$$

$$1 : 1,82 : 1,48 : 0,47$$

APÊNDICE B – MEMÓRIA DE CÁLCULOS DA TRANSFORMAÇÃO DO TRAÇO UNITÁRIO EM QUILOGRAMAS

Para os cálculos dos materiais utilizados, primeiramente calcula-se a área da seção do molde utilizado de 10x20cm com a Equação 8.

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (8)$$

Sendo:

D = diâmetro da base em (m).

$$A = \frac{\pi \times 0,10^2}{4}$$

$$A = 7,85 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

Para o cálculo do volume do cilindro utiliza-se a Equação 9.

$$V = A \times h \quad (9)$$

Onde:

A = área da base;

H = altura do molde.

$$V = 7,85 \times 10^{-3} \times 0,20$$

$$V = 1,57 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Para o cálculo de cada material (cimento, areia e água) por cilindro, utilizamos a Equação 10.

$$Q_{\text{mat}} = V_{\text{cilindro}} \times C_{\text{mat}} \times \text{traço} \quad (10)$$

Sendo:

Q_{mat} = quantidade de material em kg;

V_{cilindro} = volume do cilindro em m^3 ;

C_{mat} = consumo de material em kg/m^3 .

Sendo assim para o consumo de cimento:

$$Q_{\text{mat}} = 1,57 \times 10^{-3} \times 490 \times 1$$

$$Q_{\text{mat}} = 0,770 \text{ kg/molde}$$

Consumo de areia:

$$Q_{\text{mat}} = 1,57 \times 10^{-3} \times 891,8 \times 1,82$$

$$Q_{\text{mat}} = 2,550 \text{ kg/molde}$$

Consumo de brita:

$$Q_{mat} = 1,57 \times 10^{-3} \times 727,50 \times 1,48$$

$$Q_{mat} = 1,690 \text{ kg/molde}$$

Para a transformação da quantidade de água utiliza-se a relação a/c em ml e se multiplica pela quantidade de cimento em kg.

A TAB. 6 resume a quantidade total de cada material utilizado no concreto.

Material	Qtidade por molde em kg	Qtidade total em kg
<i>Cimento</i>	0,770	16,94
<i>Areia</i>	2,550	56,10
<i>Brita</i>	1,690	37,18
<i>Água</i>	362 ml	7,964 l

APÊNDICE C – REPRESENTAÇÃO DAS TABELAS

As tabelas abaixo constituem os gráficos 10,11 e 12.

Resultados médios dos ensaios de compressão axial						
CR	CRFA	CRFA	CRFA	CRFP	CRFP	CRFP
	15kg/m ³	20kg/m ³	30kg/m ³	500g/m ³	600g/m ³	700g/m ³
36,4	36,5	37,6	38,9	34	34,8	34,4

Resultados médios dos ensaios de tração						
CR	CRFA	CRFA	CRFA	CRFP	CRFP	CRFP
	15kg/m ³	20kg/m ³	30kg/m ³	500g/m ³	600g/m ³	700g/m ³
2,8	3,1	3,7	4,3	3,1	3,2	2,8

As tabelas abaixo se referem aos resultados de cada ensaio realizado por corpo de prova. Com esses resultados foram feitas as médias para a confecção dos gráficos mencionados no trabalho.

Resultados dos ensaios de compressão por corpo de prova

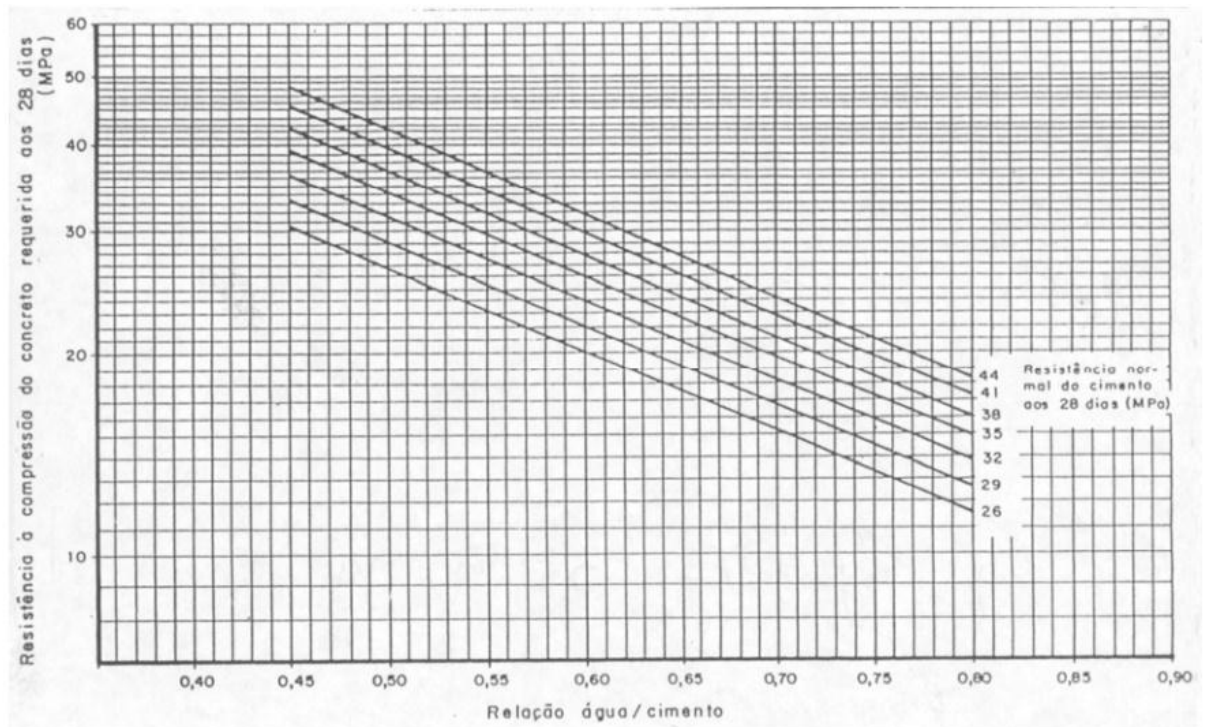
	<i>CR</i>	<i>CRFA</i>	<i>CRFA</i>	<i>CRFA</i>	<i>CRFP</i>	<i>CRFP</i>	<i>CRFP</i>
		15kg/m ³	20kg/m ³	30kg/m ³	500g/m ³	600g/m ³	700g/m ³
<i>CP1</i>	36,30	36,50	37,40	38,60	34,00	33,80	34,40
<i>CP2</i>	36,10	36,50	37,80	39,20			

Resultados dos ensaios de tração por corpo de prova

	<i>CR</i>	<i>CRFA</i>	<i>CRFA</i>	<i>CRFA</i>	<i>CRFP</i>	<i>CRFP</i>	<i>CRFP</i>
		15kg/m ³	20kg/m ³	30kg/m ³	500g/m ³	600g/m ³	700g/m ³
<i>CP1</i>	2,70	3,00	3,40	4,40	3,10	3,20	2,80
<i>CP2</i>	2,90	3,20	4,00	4,20			

ANEXO A – TABELAS UTILIZADAS PARA OS CÁLCULOS DO TRAÇO UNITÁRIO

O gráfico e as tabelas abaixo se referem ao conteúdo utilizado para o cálculo do traço de concreto utilizado na parte experimental desse trabalho.



Consumo de água aproximado (l/m ³)					
Abatimento (mm)	D _{máx} agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

MF	Dimensão máxima (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

CONDIÇÃO DE PREPARO EM FUNÇÃO DO DESVIO PADRÃO (sd)

<p>Condição A</p> <p>$sd = 4,0$ MPa</p>	<p>Materiais dosados em massa e a água de amassamento é corrigida em função da correção de umidade dos agregados. Classe C 10 a C 80.</p>
<p>Condição B</p> <p>$sd = 5,5$ MPa</p>	<p>Cimento dosado em massa, agregados dosados em massa combinada com volume, a umidade do agregado miúdo é determinada e o volume do agregado miúdo é corrigido através da curva de inchamento. Classe C 10 a C 25.</p>
<p>Condição C</p> <p>$sd = 7,0$ MPa</p>	<p>Cimento medido em massa, agregados e água em volume, umidade dos agregados estimada. Classe C 10 e C 15.</p>

ZONAS DE MÓDULOS DE FINURA DA AREIA

Tipo de areia	MF	
Areia Fina	1,55 a 2,20	Na faixa de zona utilizável inferior
Areia Média	2,20 a 2,90	Na faixa de zona ótima
Areia Grossa	2,90 a 3,50	Na faixa de zona utilizável superior

**CLASSIFICAÇÃO COMERCIAL DO AGREGADO
GRAÚDO PARA CONCRETO**

TIPO DE BRITA	FINURA (mm)
<i>Brita 0</i>	4,8 a 12,5
<i>Brita 1</i>	9,5 a 25
<i>Brita 2</i>	19 a 32
<i>Brita 3</i>	25 a 50
<i>Brita 4</i>	38 a 75
